

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh metodiky pro posuzování kvality příjmu GSM, UMTS  
a LTE signálu u mobilních telefonů**

**Proposal of Methodology for Assessing Reception Quality of  
GSM, UMTS and LTE Signals for Mobile Phones**

**2021**

**Bc. Tomáš Hmilanský**

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Lukáši Kapičákovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za zázemí a podporu.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je navrhnout metodiku posuzování kvality přijímaného signálu mobilními telefony u rádiových systémů GSM, UMTS a LTE. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část pojednává o problematice příjmu rádiového signálu a vlivech působících na rádiové vlny před dosáhnutím přijímače mobilního telefonu. Dále popisuje nejčastější typy využívaných antén a jejich umístění v mobilním zařízení. Výstupem praktické části je pak navržená metodika pro posuzování kvality příjmu signálu a vliv signálu na hlasové hovory i datové přenosy. Hlavními prvky pro testování jsou základnová stanice v laboratoři rádiových sítí, zařízení Raspberry 3 model B, USB modem a linuxový server.

## **Klíčová slova**

Rádiové systémy; UHF; Antény v mobilních zařízeních; Návrh metodiky; Testování; Hlasové hovory; Datové přenosy; GSM; UMTS; LTE

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to propose a methodology for assessing the quality of the signal received by mobile phones in GSM, UMTS and LTE radio systems. The thesis contains a theoretical and practical part. The theoretical part deals with the issue of radio signal reception and the effects acting on radio waves before reaching the mobile phone receiver. It also describes the most common types of antennas used and their location in mobile devices. The output of the practical part is the proposed methodology for assessing the quality of signal reception and impact of received signal on voice calls and data transmissions. The main elements for testing are the base station in the radio network laboratory, the Raspberry Pi 3 model B, USB modem and the Linux server.

## **Key words**

Radio systems; UHF; Antennas for mobile devices; Methodology; Testing; Voice calls; Data transmissions; GSM; UMTS; LTE

# Seznam použitých symbolů

| Symbol    | Jednotky         | Význam symbolu                             |
|-----------|------------------|--|
| P         | W, dBm           | Výkon                                      |
| G         | dBi              | Zisk                                       |
| L         | dB               | Ztráty                                     |
| d         | m                | Vzdálenost                                 |
| $\lambda$ | m                | Vlnová délka                               |
| SNR       | dB               | Poměr signálu a šumu                       |
| SAR       | W/kg             | Měrný výkon absorbovaný<br>v tkání člověka |
| S         | $W \cdot m^{-2}$ | Hustota zářivého toku                      |

## Seznam použitých zkratk

| Zkratka     | Význam                            |
|-------------|-----------------------------------|
| <b>ELF</b>  | Extremely Low Frequency           |
| <b>VLF</b>  | Very Low Frequency                |
| <b>LF</b>   | Low Frequency                     |
| <b>MF</b>   | Medium Frequency                  |
| <b>HF</b>   | High Frequency                    |
| <b>VHF</b>  | Very High Frequency               |
| <b>UHF</b>  | Ultra High Frequency              |
| <b>SHF</b>  | Super High Frequency              |
| <b>EHF</b>  | Extremely High Frequency          |
| <b>GSM</b>  | Groupe Spécial Mobile             |
| <b>UMTS</b> | Universal Mobile Telephony System |
| <b>LTE</b>  | Long Term Evolution               |
| <b>AWGN</b> | Additive White Gaussian Noise     |
| <b>DSP</b>  | Digital Signal Processor          |
| <b>BER</b>  | Bit Error Rate                    |
| <b>SNR</b>  | Signal-to-Noise Ratio             |
| <b>ISI</b>  | Intersymbol Interference          |
| <b>CNR</b>  | Carrier-to-Noise Ratio            |
| <b>TDM</b>  | Time Division Multiplex           |
| <b>GPS</b>  | Global Positioning System         |
| <b>NFC</b>  | Near-Field Communication          |
| <b>TRP</b>  | Total Radiated Power              |
| <b>TIS</b>  | Total Isotropic Sensitivity       |
| <b>TPUT</b> | Data bit Throughput               |
| <b>SAR</b>  | Specific Absorption Rate          |
| <b>PIFA</b> | Planar Inverted-F Antenna         |
| <b>IFA</b>  | Inverted-F Antenna                |

---

|               |   |
|---------------|---|
| <b>SISO</b>   | Single-Input Single-Output  |
| <b>SIMO</b>   | Single-Input Multiple-Output  |
| <b>MISO</b>   | Multiple-Input Single-Output  |
| <b>MIMO</b>   | Multiple-Input Multiple-Output  |
| <b>SWR</b>    | Standing Wave Ratio   |
| <b>RRU</b>    | Remote Radio Unit   |
| <b>RFU</b>    | Remote Frequency Unit   |
| <b>CSSR</b>   | Call Setup Success Rate   |
| <b>CBR</b>    | Call Blocking Rate  |
| <b>CDR</b>    | Call Drop Rate  |
| <b>nb-IoT</b> | Narrow Band - Internet of Things  |
| <b>GMSK</b>   | Gaussian Minimum Shift Keying   |
| <b>8PSK</b>   | 8 - Phase Shift Keying  |
| <b>DRFU</b>   | Double Radio Frequency Unit   |
| <b>LRFUe</b>  | LTE Radio Frequency Unit  |
| <b>MRFUd</b>  | Multi Radio Frequency Unit  |
| <b>VoIP</b>   | Voice over IP   |
| <b>MOS</b>    | Mean Opinion Score  |
| <b>PESQ</b>   | Perceptual Evaluation of Speech Quality   |
| <b>ITU-T</b>  | International Telecommunication Union - Telecommunication<br>Standardization Sector |
| <b>IVR</b>    | Interactive Voice Response  |
| <b>USB</b>    | Universal Serial Bus  |
| <b>ARM</b>    | Advanced RISC Machine   |
| <b>HDMI</b>   | High Definition Multimedia Interface  |
| <b>WAV</b>    | Waveform Audio File Format  |
| <b>MP3</b>    | MPEG-2 Audio Layer III  |

---

# Obsah

|   |        |
|---|--------|
| Úvod.....   | - 10 - |
| 1   Rádiové systémy .....   | - 12 - |
| 1.1   UHF pásmo .....   | - 12 - |
| 1.2   Schéma rádiového systému .....                                    | - 13 - |
| 1.3   Šíření rádiových vln .....  | - 14 - |
| 1.3.1   Ztráty šířením ve volném prostoru .....                         | - 14 - |
| 1.3.2   Dopplerův princip.....  | - 15 - |
| 1.3.3   Úniky .....   | - 15 - |
| 1.3.4   Rušení.....   | - 16 - |
| 1.4   Rádiové systémy s plošnou buňkovou strukturou .....               | - 16 - |
| 1.4.1   Handover .....  | - 17 - |
| 2   Kompenzace rádiového rušení .....                                   | - 19 - |
| 2.1   Ekvalizace .....  | - 19 - |
| 2.2   Diverzitní příjem .....   | - 19 - |
| 3   Antény v mobilních zařízeních .....                                 | - 21 - |
| 3.1   PIFA a IFA antény .....   | - 22 - |
| 3.2   Monopól .....   | - 23 - |
| 3.3   Smyčková anténa.....  | - 24 - |
| 3.4   Anténní systémy MIMO pro mobilní zařízení .....                   | - 24 - |
| 3.5   Umístění antén v mobilních zařízeních.....                        | - 25 - |
| 4   Základnová stanice mobilní sítě 2. - 4. generace .....              | - 27 - |
| 4.1   Výběr lokality, frekvence, výkonu a kapacity.....                 | - 27 - |
| 4.2   Obsah projektové dokumentace .....                                | - 27 - |
| 4.3   Plánování konfigurace anténního systému a připojení lokality..... | - 28 - |
| 4.4   Volba typu technologie .....                                      | - 29 - |
| 4.5   Ověření funkčnosti .....  | - 29 - |
| 4.6   Případná optimalizace .....                                       | - 29 - |
| 5   Technologie základnové stanice v laboratoři EB209 .....             | - 31 - |
| 6   Návrh metodiky .....  | - 33 - |



|       |  |        |
|-------|--|--------|
| 6.1   | Měřicí pracoviště.....                   | - 35 - |
| 6.2   | Testované mobilní zařízení .....         | - 36 - |
| 6.3   | Raspberry Pi 3 model B .....             | - 36 - |
| 6.4   | Asterisk a Chan-Dongle .....             | - 37 - |
| 6.5   | Vytvoření testovacího audio souboru..... | - 39 - |
| 6.6   | Nahrávání hovorů.....                    | - 40 - |
| 6.7   | PESQ analýza nahraných hovorů .....      | - 40 - |
| 6.8   | iPerf 3 .....                            | - 41 - |
| 6.9   | Postup měření.....                       | - 43 - |
| 7     | Analýza výsledků .....                   | - 47 - |
| 7.1   | Testování datových přenosů.....          | - 47 - |
| 7.1.1 | GSM .....                                | - 47 - |
| 7.1.2 | UMTS.....                                | - 48 - |
| 7.1.3 | LTE.....                                 | - 49 - |
| 7.2   | Testování hlasových hovorů.....          | - 50 - |
| 7.2.1 | GSM .....                                | - 51 - |
| 7.2.2 | UMTS.....                                | - 51 - |
| 7.2.3 | LTE.....                                 | - 52 - |
|       | Závěr .....                              | - 53 - |
|       | Použitá literatura .....                 | - 55 - |
|       | Seznam příloh.....                       | - 57 - |

## Úvod

Dnešní doba je význačná velkým technologickým růstem a snad nikdo by si nedokázal představit jaké to je nemít mobilní telefon. Mobilní zařízení přináší zjednodušení do všedního života v podobě možnosti komunikovat v podstatě na neomezenou vzdálenost a mobilního připojení k internetu. Infrastruktura rádiových sítí je ve stavu skoro neomezeného pokrytí, přesto se však můžeme dostat do situace, kdy přijímaná úroveň rádiového signálu není zrovna ideální. Horší kvalita signálu přináší omezené možnosti připojení v podobě menších přenosových rychlostí a zhoršení kvality hlasových hovorů. S těmito problémy se však každé mobilní zařízení vypořádává jinak, kdy hlavním aspektem může být například využití antény v daných zařízeních. Cílem této diplomové práce je navržení metodiky posuzování kvality příjmu rádiového signálu a to pro hlavní technologie jako jsou GSM, UMTS a LTE.

V prvních třech kapitolách je popsána problematika příjmu rádiového signálu, tedy jakým způsobem se elektromagnetické vlnění šíří volným prostorem, jak jsou nastavené obecně rádiové systémy, jak se vypořádávají vlivy volného prostoru a dále jaké antény jsou nejčastěji používány v mobilních telefonech a jejich umístění. Vnější vlivy jako jsou úniky nebo rušení nepříznivě ovlivňují rádiové vlny a před dosažením cílového zařízení je jejich úroveň mnohonásobně zmenšena. Tyto vnější vlivy však lze určitým způsobem kompenzovat a omezit tak jejich vliv. Pro tento účel se využívá principů ekvalizace pro kompenzaci rušení a diverzní příjem pro kompenzaci úniků. Další nepříznivý vliv na rádiové vlny má Dopplerův jev, který lze pozorovat kvůli pohybu uživatele při využívání mobilního zařízení a s kterým tak musí každý telekomunikační operátor počítat při návrhu své rádiové infrastruktury. Taková rádiová infrastruktura pak má plošnou buňkovou infrastrukturu a je tedy potřeba mnoho základnových stanic k pokrytí požadovaného území. Jedním z posledních důležitých aspektů vedoucích ke zlepšení nabízených služeb je využití kvalitnějších antén v mobilních zařízeních. Hlavním problémem v tomto případě, je malá velikost mobilních zařízení a proto omezený prostor pro jejich umístění. Každý výrobce tak musí vybrat nejvhodnější anténu z hlediska technických parametrů, ale i z hlediska její velikosti. Nelze tedy očekávat, že použité antény budou stejně kvalitní jako antény používané například při příjmu pozemního televizního vysílání a podobně. Antény je následně potřeba vhodně umístit tak, aby nebyly ovlivněny dalšími použitými součástkami, které působí rušivě.

Ve čtvrté kapitole je popsán způsob výstavby základnových stanic a také budou popsány technické možnosti základnové stanice dostupné na Fakultě elektrotechniky a informatiky Vysoké školy Báňské - Technické univerzity v Ostravě. Výstavbu doprovází mnoho kroků, ať už legislativních nebo technických. Například je potřeba navrhnout pro jaké technologie bude základnová stanice sloužit, zajistit určité hygienické parametry tak, aby nedocházelo k nepříznivým vlivům na zdraví lidí, kteří bydlí v okolí. Přesto, že základnová stanice v laboratoři rádiových sítí EB209 byla navržena hlavně pro výuku a pro informativní měření, tak musela projít stejnými kroky. Tato základnová stanice disponuje technologiemi GSM, UMTS, LTE a nb-IoT a byla vystavěna ve spolupráci s telekomunikačním operátorem T-Mobile.

Následující kapitoly se již týkají praktické části diplomové práce - tedy navržené metodiky posuzování příjmu rádiového signálu. V této kapitole bude nastíněn proces návrhu testování jak hlasových hovorů, tak i datových přenosů. Jsou zde popsány použité přístroje a nástroje, které jsou pro testování nezbytné. Tato metoda by měla posloužit jako možnost, jak otestovat mobilní zařízení z pohledu příjmu signálu, což je aspekt, který výrobci ve většině případů nikde neuvádějí. Budou testovány dva mobilní telefony, proto aby bylo možné následně porovnat jejich citlivost na příjem rádiového signálu. V poslední kapitole budou výsledky měření analyzovány a také bude porovnána kvalita příjmu dle jednotlivých technologií.

# 1 Rádiové systémy

Radiokomunikační systémy přenášejí informace od vysílače k přijímači ve volném prostředí prostřednictvím elektromagnetického záření, respektive rádiových vln. Ty jsou definovány jako elektromagnetické záření ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 300 GHz. Rádiové vlny jsou dále rozděleny do 8 pásem (VLF až EHF), pro které platí rozdílné fyzikální podmínky šíření [1].

Tabulka 1.1: *Rozdělení frekvenčních pásem dle ITU [1]*

| Frekvence        | Délka vlny    | Označení                       |
|------------------|---------------|--------------------------------|
| 300 Hz - 3 kHz   | 1000 - 100 km | ELF (Extremely Low Frequency)  |
| 3 kHz - 30 kHz   | 100 - 10 km   | VLF (Very Low Frequency)       |
| 30 kHz - 300 kHz | 10 - 1 km     | LF (Low Frequency)             |
| 300 kHz - 3 MHz  | 1000 - 100 m  | MF (Medium Frequency)          |
| 3 MHz - 30 MHz   | 100 - 10 m    | HF (High Frequency)            |
| 30 MHz - 300 MHz | 10 - 1 m      | VHF (Very High Frequency)      |
| 300 MHz - 3 GHz  | 100 - 10 cm   | UHF (Ultra High Frequency)     |
| 3 GHz - 30 GHz   | 10 - 1 cm     | SHF (Super High Frequency)     |
| 30 GHz - 300 GHz | 10 - 1 mm     | EHF (Extremely High Frequency) |

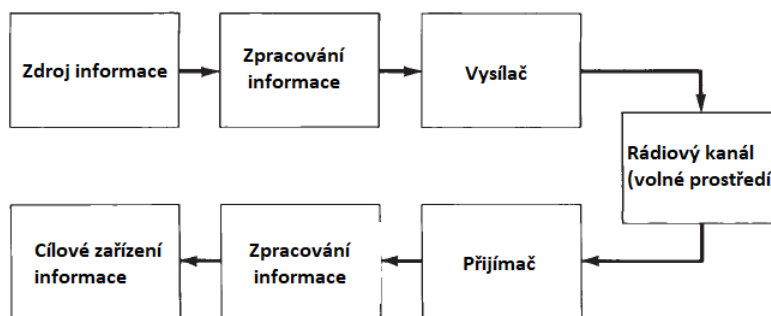
Mobilní systémy jako GSM (Groupe Spécial Mobile), UMTS (Universal Mobile Telephony System) nebo LTE (Long Term Evolution) využívají pro přenos informace pásmo UHF neboli pásmo ultra krátkých vln (viz. Tabulka 1.1). Nové mobilní systémy páté generace by měly využívat i vlny kratší z pásma SHF, případně EHF.

## 1.1 UHF pásmo

Rádiové vlny z pásma UHF se šíří přímou vlnou do vzdálenosti rádiového horizontu a jejich šíření je velmi ovlivňováno častými odrazy od překážek. Zvláště pak v městské zástavbě je třeba dobře volit místo pro vysílací antény. Avšak právě pomocí odrazů lze překlenout větší vzdálenosti. Pásmo UHF nám taktéž umožňuje využívat více antén, kdy jsou přijímače schopny zkombinovat více přijatých signálů a zmenšit tak vliv rušení. Díky větším šířkám pásma a adaptivní ekvalizace je možné používat větší množství modulací a dosáhnout tak větších přenosových rychlostí. Toto pásmo je využíváno jak analogovými, tak i digitálními mobilními systémy [2].

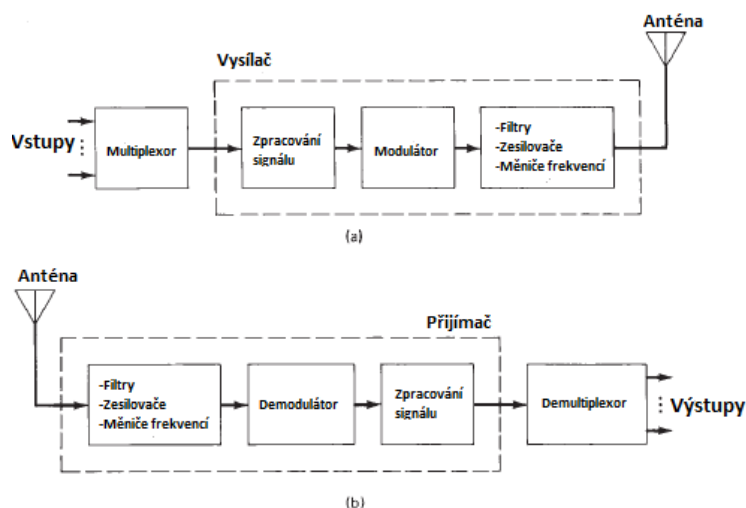
## 1.2 Schéma rádiového systému

Jak už název napovídá, tak hlavním kritériem rádiového systému je přenos informací elektromagnetickými vlnami volným prostorem. Volné prostředí je tedy rádiovým kanálem a jeho parametry můžeme dělit na náhodné (Gaussovský šum - AWGN, úniky nebo rušení) a nenáhodné (zpoždění signálu, fázový posuv apod.). Dále rádiové systémy obsahují vysílač a přijímač. Obě strany pracují na stejných principech, které jsou ve většině případů navzájem protikladné (například vysílač obsahuje modulátor a přijímač zase demodulátor).



Obrázek 1.1: Zjednodušené blokové schéma rádiového systému [3]

Jak vysílač, tak i přijímač obsahují kodéry (zdrojové a kanálové), modulátor/demodulátor, frekvenční filtry, zesilovače, měniče frekvencí a DSP (Digital Signal Processor) pro zpracování digitálního signálu. Poslední dvě části rádiového systému je zdroj informace (například mikrofon mobilního telefonu) na začátku a cílové zařízení (například reproduktor) na konci řetězce. Přenášená informace jde tedy ze zdroje přes multiplexor do vysílače, kde se signál postupně připraví k přenosu, následně je modulován, zesílen a vysílací anténou vyslán volným prostorem k přijímací anténě. Po přijetí je signál nejprve znovu zesílen a demodulován, stejnými avšak protikladnými operacemi je signál upraven, zpracován a následně demultiplexován pro cílové zařízení [2][3].



Obrázek 1.2: Zjednodušené blokové schéma a) vysílače, b) přijímače rádiového systému [3]

### 1.3 Šíření rádiových vln

Jedním z hlavních parametrů rádiových spojení je celkový útlum plánovaných tras. Ten je definovaný jako rozdíl vysílaného výkonu a výkonu přijatého, pokud známe útlum, tak můžeme plánovat pokrytí určité oblasti, stanovit vysílací výkony, typy a nasměrování antén. Šíření rádiových vln je takto popsáno radiokomunikační rovnicí [1]:

$$P_r = G_t + G_r + P_t + L_0 + L_p + L_\phi \text{ [dB]} \quad (1.1)$$

Kde  $P_r$  je úroveň přijatého výkonu

$G_t$  je zisk vysílací antény

$G_r$  je zisk přijímací antény

$P_t$  je úroveň vysílacího výkonu

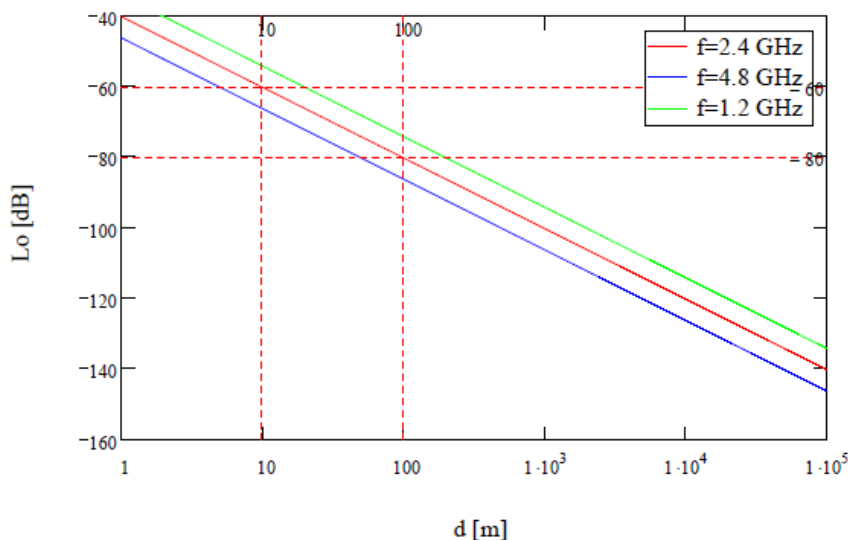
$L_0$  jsou ztráty způsobené šířením vlny volným prostředím

$L_p$  jsou polarizační ztráty

$L_\phi$  jsou ztráty nepřesným zaměřením antén

#### 1.3.1 Ztráty šířením ve volném prostoru

Při přenosu signálu volným prostorem dochází k jeho útlumu, který je závislý na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem a typu prostředí. Ztráty ve volném prostoru neboli FSL rostou s druhou mocninou vzdálenosti (o 20 dB na dekádu).



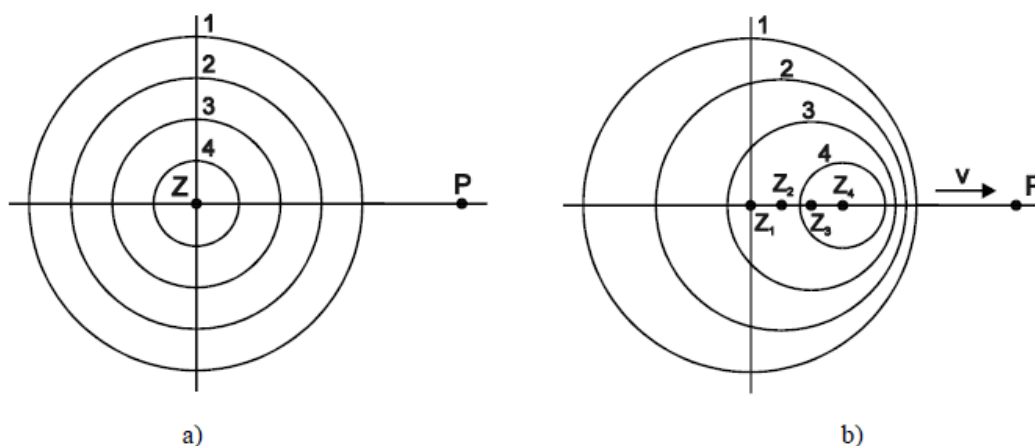
Obrázek 1.3: Závislost FSL na vzdálenosti [1]

Ztráty ve volném prostoru můžeme vypočítat pomocí následujícího vztahu, kde  $d$  je vzdálenost od vysílače a  $\lambda$  je vlnová délka [1]:

$$L_0 = 10 \cdot \log \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \text{ [dB]} \quad (1.2)$$

### 1.3.2 Dopplerův princip

Dopplerův princip nám říká, že při vzájemném pohybu vysílače a přijímače se mění frekvence přijímaného signálu a to tak, že při vzdalování se přijímače od vysílače se frekvence zmenšuje a naopak při vzájemném přibližování se frekvence zvětšuje.



Obrázek 1.4: Šíření vln z vysílací antény (Z) a) v klidu, b) v pohybu

V mobilních komunikacích proto dochází ke změnám frekvencí, což může mít v krajních případech za následek chybu přijímaných dat. Například systém GSM je navržen pro pohyb do 250 km/hod., kdy je odchylka frekvence zhruba 208 Hz. Můžou nastat celkem čtyři případy Dopplerova jevu [2]:

- vysílač se pohybuje vzhledem ke klidnému přijímači v klidném prostředí,
- přijímač se pohybuje vzhledem ke klidnému vysílači v klidném prostředí,
- vysílač i přijímač se pohybují v klidném prostředí,
- pohyb prostředí.

### 1.3.3 Úniky

Při příjmu rádiového signálu může docházet ke kolísání úrovně signálu a tento jev nazýváme únik. Úniky mohou být způsobeny například vícecestným šířením, překážkami v terénu nebo změnami parametrů ionosféry. Vše je navíc zkomplikované pohybem mobilní stanice vůči základnové stanici, popřípadě se mohou pohybovat překážky, na kterých vznikají odrazy - podmínky příjmu signálu jsou časově závislé. Pro omezení vlivu úniků a dalších rušivých jevů (různá atmosférická a průmyslová rušení) na příjem rádiového signálu se využívá diverzitní příjem a ekvalizace. Úniky se dělí na dva typy a to na pomalé a rychlé úniky.

- **Pomalé úniky** - jsou způsobeny zastíněním mobilní stanice relativně velkou překážkou, nejsou tudíž příliš časově závislé a proto se nazývají pomalými. Pomalé

úniky se kompenzují makroskopickými diverzitními systémy (mobilní stanice si vybere z několika základnových stanic tu, se kterou má nejlepší spojení).

- **Rychlé úniky** - neboli Rayleighovy úniky, jsou způsobeny vícecestným šířením signálu a pohybem mobilní stanice (Dopplerův jev), jsou tudíž hodně časově závislé a proto se nazývají rychlými. Rychlé úniky se kompenzují mikroskopickými diverzitními systémy (využívá se přenos na více rádiových kanálech). [2]

#### 1.3.4 Rušení

Rušení je dalším nepříznivým jevem, který ovlivňuje kvalitu přijímaného signálu. Jeho vznik může být různý, nejčastěji se jedná o atmosférické (přírodní) rušení, které lze modelovat jako bílý šum AWGN. Rušení může však vznikat zasahováním jiných rádiových systémů do daného frekvenčního pásma. Obecně označujeme taková rušení jako rádiový šum, který je popsán poměrem SNR (Signal-to-Noise Ratio) nebo S/N, pro modulovaný signál se používá zkratka CNR (Carrier-to-Noise Ratio). Pro SNR platí vztah:

$$SNR = \frac{\text{Výkon užitečného signálu}}{\text{Výkon šumu}} [dB] \quad (1.3)$$

Pro lepší kvalitu přijímaného signálu je tedy potřeba, aby byl tento poměr co největší. Potřebujeme tedy, aby výkon užitečného signálu byl mnohem větší než výkon šumu. Po překročení určité hodnoty SNR, začne systém vykazovat chyby, popřípadě přestane úplně fungovat. Od poměru SNR se následně odvíjí i vztah pro výpočet bitové chybovosti BER (vztahuje se jen k digitálním systémům), která udává kvalitu spoje [2]:

$$BER = \frac{\text{Počet chybně přijatých bitů za 1s}}{\text{Počet všech přijatých bitů za 1s}} \quad (1.4)$$

### 1.4 Rádiové systémy s plošnou buňkovou strukturou

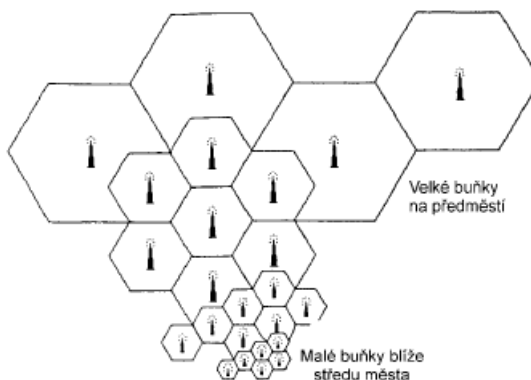
Existuje několik typů rádiových spojení, jako je spojení PP (spojení bod-bod), které je užívané například pro mikrovlnné spoje, nebo spojení PM (spojení bod-více bodů). Mobilní technologie jako GSM, UMTS nebo LTE využívají buňkovou strukturu rádiové sítě. Hlavní myšlenkou plošné buňkové struktury je rozdělení většího území (například v rámci státu) na velké množství malých území, respektive buněk. V každé takové buňce je umístěna základnová stanice, která zajišťuje spojení účastníků nacházejících se v dané buňce s rádiovým systémem. Tyto buňky lze rozdělit dle velikosti na [2]:

- **Makrobuňky** - největší typ buňky, využívá se v místech, kde není velká hustota rádiového provozu (venkovské oblasti apod.). Makrobuňky mají poloměr až několik desítek kilometrů.
- **Mikrobuňky** - používají se na území s velkou hustotou rádiového provozu (centra měst apod.), jejich poloměr bývá do 1 km.
- **Pikobuňky** - mají poloměr několika desítek metrů a jsou využívány v místech, kde je velká koncentrace lidí (nákupní centra apod.).



- **Deštníkové buňky** - jedná se o malé buňky, které se využívají k pokrytí nepokrytých území mezi pikobuňkami, popřípadě mikrobunčkami.

Kombinací všech typů buněk se pak pokrývají celé státy, dle potřeby rádiového provozu. Celá struktura je pak rozložena po několika buňkách do svazků buněk, které jsou řízené základnovou řídicí jednotkou.



Obrázek 1.5: Plošná buňková struktura rádiových systémů [2]

#### 1.4.1 Handover

Pokud se účastník během komunikace nachází na kraji buňky, nebo přechází z jedné buňky do druhé, tak dochází k přepojení mezi základnovými stanicemi a tento proces se nazývá handover. Pokud je síla signálu vyhodnocena jako nevyhovující (dochází k výpadkům, velkému zpoždění apod.) a je k dispozici kanál s lepší úrovní signálu, tak je účastník přepojen právě na kanál s lepším signálem. Právě podle přepínacího procesu dělíme handover na [2]:

- **Tvrdý handover** - spojení je přerušeno a až potom je účastník přepojen na nový kanál a při přepojování dochází k přerušení spoje (do 100 ms), přerušení je při hovoru nepostřehnutelné, avšak při datovém spoji, může dojít ke ztrátě informace. Tvrdý handover využívá například systém GSM.
- **Bezešvý handover** - nedochází k přerušení spoje, protože se nejdříve vytvoří spojení s novým kanálem a až potom je zrušeno spojení s původním kanálem (chvíli tedy dochází k paralelnímu spojení s oběma kanály).
- **Měkký handover** - při měkkém handoveru dochází k paralelnímu spojení se všemi dostupnými základnovými stanicemi (při této variantě jsou kladené velké nároky na kapacitu sítě). Měkký handover využívá například UMTS.

Handover se dále dělí podle toho, jak je vyhodnocováno přepojování mezi základnovými stanicemi [2]:

- **Sítí řízený handover (NCHO)** - kvalitu kanálu měří základnová stanice a na základě výsledků rozhoduje o přepnutí na jiný kanál.

- **Handover řízený mobilní stanicí (MCHO)** - kvalitu kanálu měří jak základnová stanice, tak i mobilní stanice, o přepnutí na jiný kanál však rozhoduje mobilní stanice.
- **Sítí řízený handover s asistencí mobilní stanice (MAHO)** - mobilní stanice měří kvalitu okolních kanálů a výsledky posílá do sítě a na základě výsledků rozhodně základová stanice o handoveru.

Handover je jeden z důvodů, proč je nutné monitorovat sílu a kvalitu přijatého signálu, spojení mezi základnovou a mobilní stanicí je tedy kontinuálně měřeno. Všechny rádiové systémy pak mají dané určité hodnoty, podle kterých je vyhodnocena kvalita spojení a při překročení dané úrovně se provádí handover, tedy v případě, že je to možné, jinak dochází k rozpadu spojení. Hraniční hodnoty síly přijímaného signálu technologií GSM, UMTS a LTE jsou shrnuté v následující tabulce (tyto hodnoty se mohou lišit u jednotlivých telekomunikačních operátorů:

Tabulka 1.2: *Minimální přijímané výkonové úrovně pro standardy GSM, UMTS a LTE [5]*

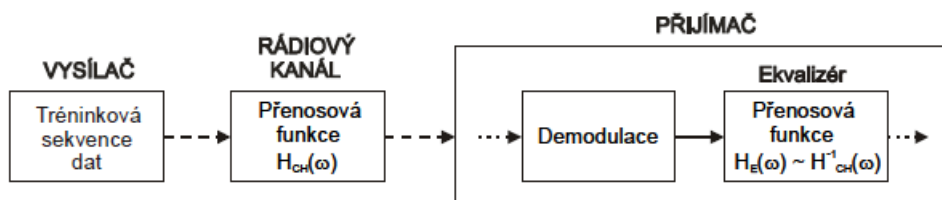
| Úroveň přijímaného signálu [dBm] |             |             |             |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                  | GSM         | UMTS        | LTE         |
| Minimální přijímaný výkon        | -110 a více | -120 a více | -130 a více |

## 2 Kompenzace rádiového rušení

Aby nabízené služby v oblasti rádiových sítí byly kvalitnější, tak je potřeba kompenzovat vliv vnějších rušivých vlivů a úniků na rádiový kanál. K potlačení vlivu vnějšího rušení se využívá ekvalizace a k potlačení vlivu úniků zase princip diverzitního příjmu.

### 2.1 Ekvalizace

Jak bylo nastíněno v předchozí kapitole, na rádiový signál v reálném rádiovém kanále působí velké množství rušivých elementů. Skoro všechny rušivé vlivy lze považovat za různé formy frekvenčního neboli lineárního zkreslení. Takové lineární zkreslení lze v přijímači kompenzovat pomocí ekvalizačních obvodů. Pro správné sestavení takového obvodu je potřeba detailně znát vlastnosti rádiového kanálu, respektive musíme znát jeho přenosovou funkci. Tu získáme měřením odezvy v přijímači na předem známý signál a na základě této odezvy a známého signálu je možné vypočítat přenosovou funkci kanálu a stanovit přenosovou funkci ekvalizéru.



Obrázek 1.6: *Blokové schéma kompenzace rádiového rušení [2]*

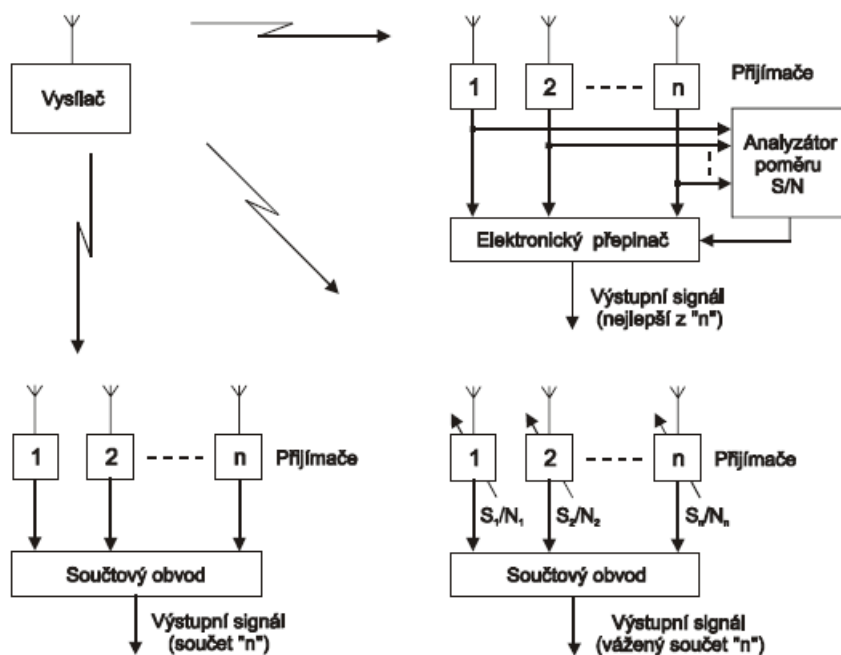
Jelikož se vlastnosti rádiového kanálu mění s časem, tak je potřeba aby bylo možné ekvalizační obvody korigovat během přenosu. Proces, při kterém se mění nastavení ekvalizéru v určitých časových intervalech, nazýváme adaptivní ekvalizace. U digitálních systémů se provádí ekvalizace za účelem minimalizace intersymbolových interferencí ISI (Intersymbol Interference) a bitové chybovosti BER. Samotná ekvalizace se provádí v určitých časových intervalech, kdy se do vysílaného signálu vkládá předem známá tréninková sekvence dat. Po vyhodnocení se přenosová charakteristika ekvalizéru nastavuje periodicky [2].

### 2.2 Diverzitní příjem

Diverzitní příjem se využívá pro kompenzaci kolísání úrovně signálů, tedy úniků. Podstatou je vytvoření několika nezávislých rádiových kanálů, ve kterých je přenášený stejný signál. Hlavní podmínkou diverzitního příjmu je minimální vzájemná korelace úniků v jednotlivých kanálech. Pro vytváření nezávislých rádiových kanálů máme několik možností [2]:

- **Diverzitní systém s prostorovým výběrem** - jeden vysílač, na přijímací straně je více antén vzájemně posunutých o určitou vlnovou délku.
- **Diverzitní systém s úhlovým výběrem** - podobný k systému s prostorovým výběrem, na přijímací straně se využívají směrové antény, které přijímají odražené vlny signálu z různých směrů.

- **Diverzitní systém s polarizačním výběrem** - v tomto případě je potřeba na vysílací straně dvě antény, každá s jiným typem polarizace. Signály přenášené rádiovými vlnami s jinou polarizací mají slabě korelovatelné úniky.
- **Diverzitní systém s frekvenčním výběrem** - mohou využívat jednu vysílací a jednu přijímací anténu, avšak musí být použito více přijímačů (podle počtu frekvencí, pro každou jeden přijímač). Odstup jednotlivých nosných musí být 2 - 4%.
- **Diverzitní systém s časovým výběrem** - takové systémy se chovají jako systémy s časovým multiplexem. Rámec TDM (Time Division Multiplex) může mít délku až několik sekund, z čehož plyne hlavní nevýhoda tohoto systému a to je dlouhá doba přenosu.



Obrázek 1.7: *Způsoby sdružování jednotlivých nosných v přijímači [2]*

### 3 Antény v mobilních zařízeních

Antény pro mobilní zařízení hrají hlavní roli v příjmu a vysílání rádiových vln a právě kvůli rychlému vývoji rádiových sítí je na ně kladeno velké množství požadavků. Navíc po příchodu chytrých telefonů se frekvenční pásmo telefonů stává širší a místo pro anténu se zmenšuje. Vždyť nejdůležitějším aspektem každého chytrého telefonu je konektivita se všemi bezdrátovými standardy napříč generacemi (2G, 3G, 4G a nově i 5G), ale dále také Wi-Fi, GPS (Global Positioning Systém), Bluetooth nebo NFC (Near-Field Communication). Navíc pro lepší příjem signálu se v posledních dvou generacích využívá anténních systémů MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), kdy chytrý telefon musí mít pro příjem např. LTE signálu hned několik antén. Hlavním cílem výrobců telefonů je tedy vytvoření kompaktní širokopásmové antény s co nejmenšími rozměry.

Tabulka 1.3: *Přehled bezdrátových standardů a některých jejich frekvenčních pásem [4][12]*

| Generace  | Standard  | Pásmo        | Uplink [MHz] | Downlink [MHz] |
|-----------|---|--------------|--------------|----------------|
| <b>2G</b> | GSM   | GSM850       | 824-849      | 869-894        |
|           |   | GSM900       | 880-914      | 925-959        |
|           |   | GSM1800      | 1710-1784    | 1805-1879      |
|           |   | GSM1900      | 1850-1910    | 1930-1990      |
| <b>3G</b> | UMTS  | UMTS Band I  | 1920-1980    | 2110-2170      |
|           |   | UMTS Band II | 1850-1910    | 1930-1990      |
|           |   | UMTS Band V  | 824-849      | 869-894        |
| <b>4G</b> | LTE   | LTE2300      | 2305-2400    | 2350-2360      |
|           |   | LTE2500      | 2500-2690    |                |
| <b>5G</b> | Dle specifikací 3GPP bude 5G pracovat v pásmech 410 Mhz - 7125 MHz a 24,25 GHz - 52,6 GHz |              |              |                |

Pro diverzitní příjem a technologii MIMO je navíc vyžadováno, aby antény měly co nejmenší vzájemnou vazbu a korelaci a bylo tak možné dosáhnout lepšího výkonu. Při vzájemné vazbě dochází ke korelaci mezi kanály a následně ztrátě jejich kapacity. Hlavní parametry charakterizující antény pro mobilní zařízení můžeme shrnout následovně:

- Impedanční přizpůsobení
- Účinnost vyzařování
- Zisk antény
- MIMO kapacita
- TRP (celkový vyzařený výkon)

- TIS (celková izotropní citlivost)
- TPUT (bitová propustnost)
- SAR (specifická míra absorpce)

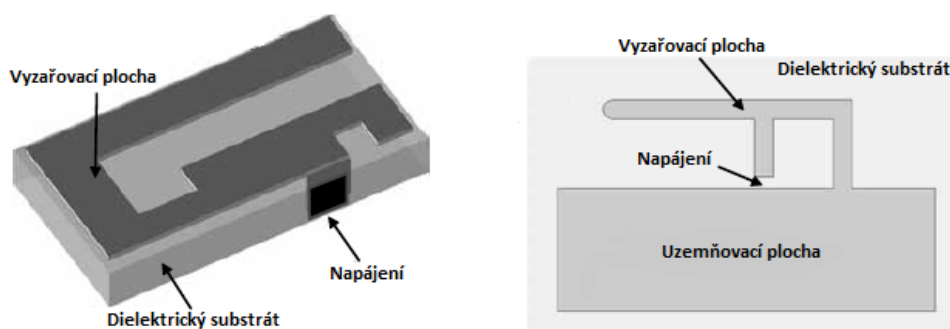
Poslední zmíněný SAR je nejdůležitějším parametrem z hlediska zdraví, protože udává, jaké množství výkonu se absorbuje v živé lidské tkáni. Antény určené pro mobilní zařízení musí proto projít měřením parametru SAR a splnit určité hygienické a zdravotní normy. Anténa s vysokou hodnotou SAR by při klasickém používání chytrého telefonu mohla způsobit zdravotní problémy. SAR má jednotku W/kg a v Evropě platí norma, že její hodnota musí být menší než 2 W/kg [4].

Nejlépe výše zmíněné parametry splňují mikropáskové antény a to hlavně co se týče jejich rozměrů. Jedná se o tenké rovinné antény, které vyzařují elektromagnetické vlny z jejich okrajů. Jsou složeny z dielektrického substrátu (např. deska plošného spoje), kovové záplaty umístěné na jedné straně, do které se následně vyleptá vzor anténního prvku, a uzemňovací plochy. Tato kovová záplata je nejčastěji vyráběna z mědi popřípadě ze zlata a může mít čtvercový, kruhový, trojúhelníkový nebo jiný tvar. Návrh tvaru záplaty musí být náležitě vypočten, protože tvarem se ovlivňují parametry jako impedance, polarizace nebo frekvence, na které bude anténa pracovat (nejčastěji se využívá obdélníkový a kruhový tvar). Pro dielektrický substrát se využívají materiály s nízkou dielektrickou konstantou. Mikropáskové antény jsou tedy velice malé a lehké, levné na výrobu a lze je umístit na rovinné předměty, což z nich dělá ideální antény pro mobilní zařízení. Přes všechny tyto výhody jsou mikropáskové antény náchylné na dielektrické ztráty a ztráty vodičů a mají tedy nižší účinnost, mají malou šířku pásma a jsou náchylné na rušení. Tato omezení jsou však překonávána výzkumem a to hlavně v oblasti šířky pásma. Nejčastěji využívanými typy mikropáskových antén v mobilních zařízeních jsou PIFA, IFA, složený monopól a smyčková anténa [4].

### 3.1 PIFA a IFA antény

PIFA (Planar Inverted-F Antenna) je mikropásková anténa se všesměrovou vyzařovací charakteristikou. PIFA se skládá z vyzařovací záplaty a elektricky velké uzemňovací plochy, obě části jsou spojeny kovovým spojem (buď kolíkem, nebo deskou). Jako dielektrický substrát může být místo desky plošného spoje využit vzduch a díky tomu jsou PIFA antény velmi účinné. Hlavní výhodou je možnost využití pro více frekvenčních pásem najednou a tím pádem jsou velmi často používané právě v mobilních zařízeních. Vyzařované elektromagnetické vlny navíc příliš neprochází uzemňovací plochou, což v případě mobilních telefonů pomáhá snížit množství ztracené energie vyzářené do těla uživatele, tudíž je menší i hodnota SAR. Její šířka pásma závisí na její velikosti a velikosti uzemňovací plochy (jako uzemňovací plocha může být využit i dotyková plocha chytrého telefonu nebo deska plošného spoje, díky čemuž lze dosáhnout velkých šířek pásma) a může být tím pádem využita pro různé bezdrátové technologie. Nejčastěji jsou však PIFA antény využívány pro technologie jako jsou GSM nebo LTE [4].

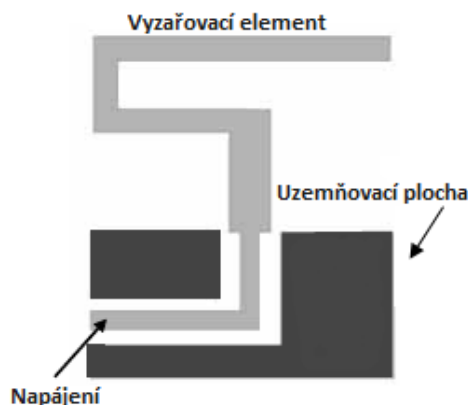
Dalším typem antén využívaných v mobilních zařízeních jsou antény IFA (Inverted-F Antenna), které sice sdílí podobný název, ale jsou příbuzné spíše monopólům, kdežto PIFA antény jsou podobné patch anténám. Vyzařovací plocha má tvar obráceného F, kdy se prakticky jedná o skládaný monopól souběžný s uzemňovací plochou a v jednom bodě i s ní spojený. Stejně jako PIFA antény i IFA jsou vhodné pro více frekvenčních pásem najednou, kdy jednou z možností jak toho dosáhnout je poskládání dvou a více F prvkových vzorů. Oba typy antén PIFA i IFA umožňují kombinování s jinými typy antén bez toho, aby se vzájemně ovlivňovaly a proto jsou tak často využívány u mobilních zařízeních pro dosažení podpory velkého množství rádiových technologií. Antény IFA jsou nejčastěji využívány pro technologii Bluetooth [4].



Obrázek 1.8: PIFA anténa (vlevo) a IFA anténa (vpravo) [4]

### 3.2 Monopól

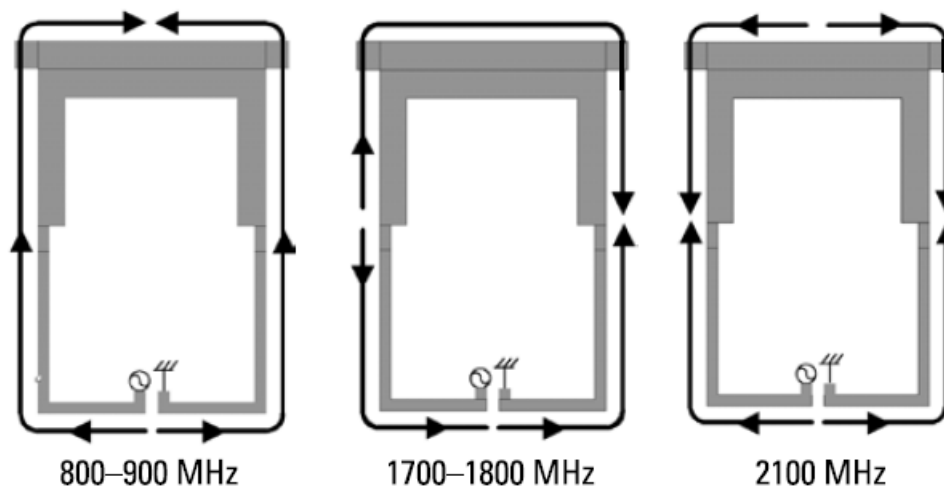
Monopól je další často využívanou anténou v mobilních zařízeních, hlavně díky jeho velké šířce pásma. Ta je větší i než u některých dipólů nebo PIFA a IFA antén. Skládá se jen z jednoho rezonančního elementu, který je přímo napájen. V mobilních zařízeních se nejčastěji využívají pro technologii Wi-Fi a to hlavně kvůli šířce pásma, její malé velikosti a velké vyzařovací účinnosti. Jelikož je důležité, aby anténa pro Wi-Fi přenosy mohla využívat pásma 2,4 GHz a 5 GHz, tak jsou do mobilních telefonů umístěny dva monopóly, kdy jeden pracuje na frekvencích 2,4 GHz a druhý na 5 GHz [4].



Obrázek 1.9: Monopól [4]

### 3.3 Smyčková anténa

Dalším často využívaným typem antén v mobilních zařízeních je smyčková anténa, která má tvar smyčky. Skládá se z vyzařovacího elementu, napájecí svorky a uzemňovací svorky a díky skládání lze dosáhnout toho, aby anténa pracovala na více frekvencích. Její hlavní výhodou jsou malé výkonové ztráty při interakci s mobilním zařízením, tedy anténa nevyzařuje tolik energie do lidského těla. Toho však lze dosáhnout jen v případě, kdy anténa má stejné rozměry jako délka vyzařované vlny. Již při poloviční velikosti jsou výkonové ztráty stejné jako u jiných antén [6].



Obrázek 1.10: Smyčková anténa a její proudové obložení pro různé frekvence [6]

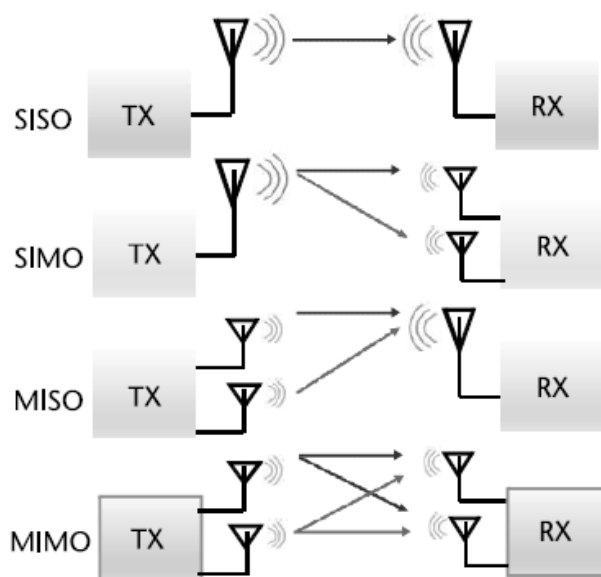
### 3.4 Anténní systémy MIMO pro mobilní zařízení

Technologie MIMO je nejčastěji využívána se standardem LTE pro zvýšení přenosových rychlostí a kapacity přenosových kanálů. Hlavní myšlenkou je využití více antén na vysílací i přijímací straně bez nutnosti zvýšení vysílacího výkonu nebo šířky pásma. Systémy MIMO v mobilních telefonech jsou složeny z 3D monopólu, který má schopnost pracovat ve dvou frekvenčních pásmech (v podstatě pracuje jako dva monopóly). Prvním monopólem je vyzařovací plocha těsně za napájením po dielektrický substrát a druhý monopól je pak celá vyzařovací plocha. V chytrých telefonech se využívají dva takové 3D monopóly, kdy jeden je určený pro horizontální polarizaci a druhý pro vertikální. Samotný systém pracuje na principu diverzitního příjmu, který byl popsán výše (viz. kapitola 2.2). Existují i jiné typy anténních systémů, hlavní rozdělení vypadá takhle [4]:

- **SISO** (Single-Input Single-Output) - tento systém obsahuje jen jednu anténu na vysílací a přijímací straně a nezavádí žádné zlepšení ať už z hlediska přenosové rychlosti, nebo kapacity kanálu. Jedná se tedy základní typ systému antén
- **SIMO** (Single-Input Multiple-Output)- obsahuje jednu vysílací anténu a více přijímacích antén. Zavádí diverzitní příjem na přijímací straně a přidává robustnost přenosu, přesto však nezvyšuje přenosovou rychlost ani kapacitu kanálů.



- **MISO** (Multiple-Input Single-Output) - obsahuje více vysílacích antén a jednu přijímací anténu. Zavádí diverzitu na vysílací straně, kdy každá z přenosových tras bude mít jiný útlum (dojde k jiným únikům signálu) a na straně přijímací se všechny vyslané signály sečtou, kdy dominovat bude ten silnější.
- **MIMO** - jedná se o nejlepší variantu, kdy je využito více antén jak na vysílací straně, tak i na straně přijímací. Zavádí tedy diverzitu na obou stranách bezdrátového přenosu, díky čemuž je možné dosáhnout vyšších přenosových rychlostí i kapacit kanálů.

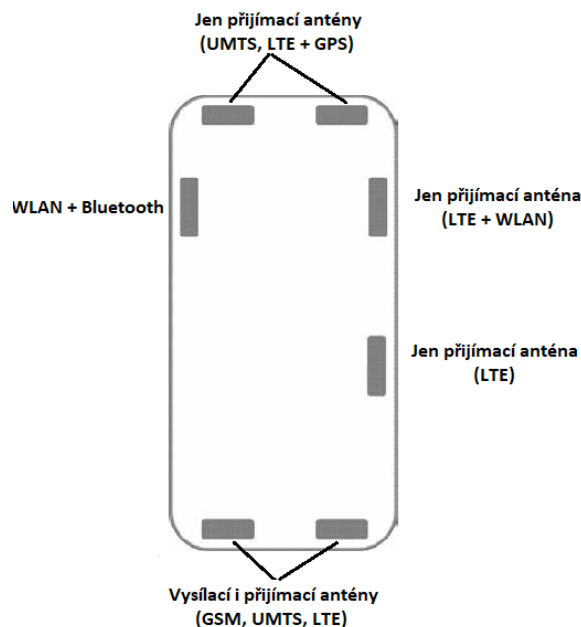


Obrázek 1.11: Rozdělení typů bezdrátových systémů [4]

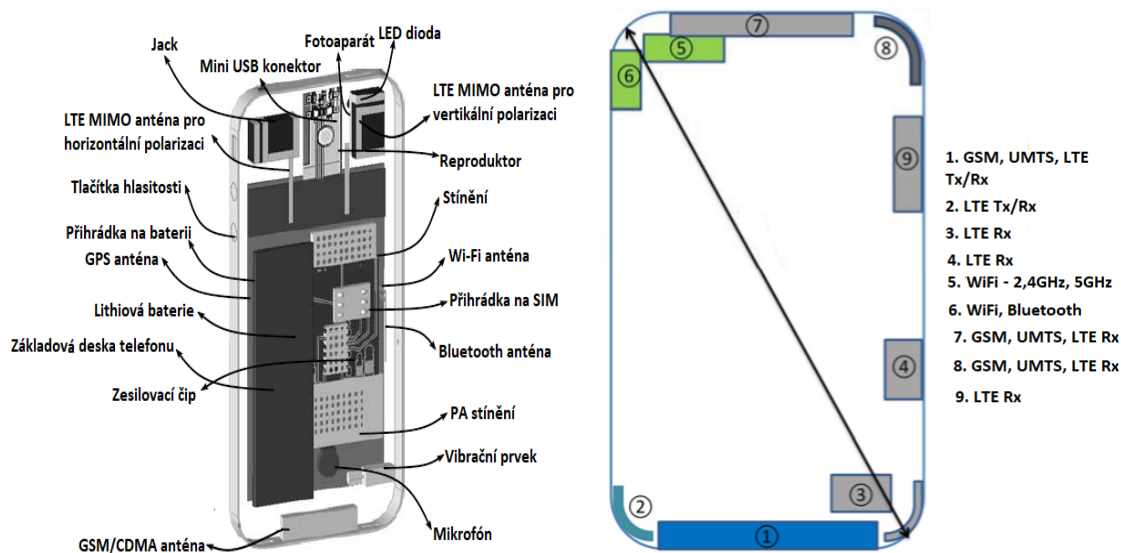
### 3.5 Umístění antén v mobilních zařízeních

Antény potřebné pro bezdrátový přenos mobilních standardů je potřeba vhodně umístit v mobilních zařízeních, protože se jejich chování mění v přítomnosti jiných součástí a krytu telefonu. Ostatní součástky jsou navíc také ovlivňovány vysílanými a přijímanými elektromagnetickými vlnami. Dalším krokem po vybrání vhodných antén, je tedy jejich umístění a provedení nezbytných elektromagnetických simulací. Díky těmto simulacím lze zjistit, jak budou antény pracovat ve spojení jiných dílů, jako je fotoaparát, kondenzátory blesku (jen v případě xenonových blesků, avšak ve většině případů se využívá blesků diodových) nebo baterie, ale také dielektrických materiálů (například displej nebo kryt mobilního zařízení). Tyto komponenty mohou totiž ovlivňovat útlum, zisk a vyzařovací charakteristiku antén. Stejně tak je potřeba zjistit, jak se antény chovají v přítomnosti lidského těla, proto se dělají simulace se standardním lidským modelem, také nazývaným SAM (ten zpravidla obsahuje hlavu, rameno a ruku v které je umístěno mobilní zařízení). Veškeré simulace a měření jsou hlavními požadavky pro uvedení mobilního telefonu na komerční trh. Samotné umístění antén se příliš neliší u různých výrobců mobilních zařízení, jako je například pro operační systém iOS firma Apple nebo pro Android například firmy Samsung nebo Xiaomi. V mobilních zařízeních je však málo prostoru

pro umístění antén tak, aby nedocházelo k ovlivňování jejich výkonosti. Z tohoto důvodu jsou dána hlavní místa, kde se antény umísťují (viz. Obrázek 1.11). U různých výrobců se může však lišit typ antén a jejich frekvenční využití pro různé bezdrátové standardy. Příklad umístění antén v mobilních zařízeních od výrobců Apple a Samsung je uveden na Obrázku 1.13, u různých modelů se rozmístění může lišit [4].



Obrázek 1.12: Obecné rozestavení antén v mobilním zařízení [6]



Obrázek 1.13: Antény a některé komponenty mobilního zařízení IOS (vlevo) a Android (vpravo) [4][7]

## 4 Základnová stanice mobilní sítě 2. - 4. generace

Nové základnové stanice jsou budovány hlavně z důvodů pokrytí nové zastavěné oblasti (průmyslové zóny, obchodní a kulturní centra atd.), stížností na nedostatečné pokrytí ze strany uživatelů nebo nedostatečné kapacity stávajících základnových stanic v daných lokalitách (navýšení počtu uživatelů). Výstavba nové základnové stanice je rozdělena do několika kroků. Ty nejdůležitější z hlediska rádiových sítí lze shrnout následovně [8]:

- výběr lokality,
- volba frekvence, výkonu a kapacity,
- zpracování projektové dokumentace,
- plánování konfigurace anténního systému a připojení lokality,
- volba typu technologie,
- ověření funkčnosti a integrace do sítě,
- případná optimalizace.

### 4.1 Výběr lokality, frekvence, výkonu a kapacity

Nejdůležitější částí výstavby je volba umístění základnové stanice, který ovlivňuje konečný výsledek pokrytí území rádiovým signálem. Posouzení umístění je individuální a často je to otázka kompromisů. Výběr lokality může být také ovlivněn například nerealizovatelností elektrické přípojky, optického připojení, mikrovlnného připojení, nesouhlasem památkářů a ochránců přírody, nebo neúměrně vysokými náklady na vlastní technickou realizaci apod. Samotná realizace závisí na spoustě faktorů, jako jsou [8]:

- charakter okolí,
- vlnová délka použité frekvence,
- zeměpisné podmínky,
- zástavba, použité materiály na konstrukci budov.

Frekvence se vybírá z kmitočtového pásma, které je přiřazené danému telekomunikačnímu operátorovi. Poněkud problematičtější je pak výstavba v pohraničních oblastech, protože lze použít jen některé přidělené kanály v závislosti použitých kanálů sousední země. Volba kmitočtů je také omezena již použitými kmitočty sousední základnové stanice. Kapacita a výkon se určují na základě oblasti, kde se základnová stanice bude nacházet, například v oblastech s menší hustotou osídlení není nutná příliš velká kapacita. Výkon pak závisí na počtu a vzdálenosti okolních základnových stanic [8].

### 4.2 Obsah projektové dokumentace

Jelikož projektová dokumentace musí splňovat veškeré předepsané normy, tak musí také být zpracována nebo minimálně zkontrolována autorizovaným projektantem. Taková dokumentace obsahuje výpočet hygienických parametrů, rozmístění antén a popis využívaných technologií (obsahuje například i metalické nebo optické připojení do sítě), ale dále taky musí

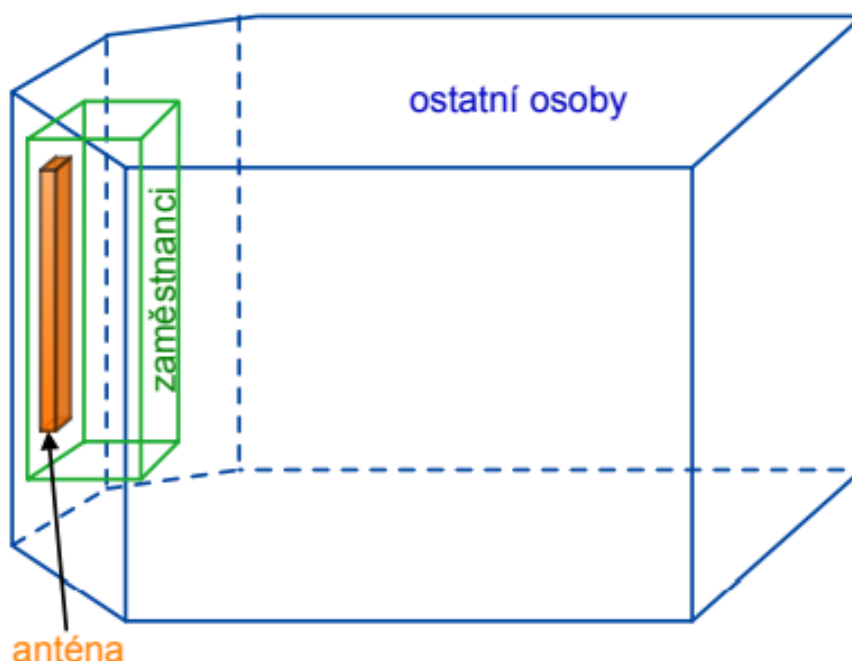
obsahovat dokumentaci ocelových konstrukcí věže, výpočet statiky apod. Nejdůležitější částí je dokumentace hygienických parametrů, které musí splňovat zákonem předepsané limity. Limitní hodnoty pro elektrická a magnetická pole a elektromagnetická záření jsou pak rozdílné pro osoby seznámené s riziky (tedy pro zaměstnance) a pro ostatní fyzické osoby [8]:

Tabulka 1.4: Limitní hygienické hodnoty [8]

**SAR [ $W/kg$ ] pro  $f = 100kHz - 6GHz$      $S [W \cdot m^{-2}]$  pro  $f = 6GHz - 300GHz$**

|                      |      |    |
|----------------------|------|----|
| <b>Zaměstnanci</b>   | 0,4  | 50 |
| <b>Ostatní osoby</b> | 0,08 | 10 |

Pro výpočet těchto hodnot je sjednocující postup, podle kterého lze i určit rozměry zón s možným překročením limitních hodnot. V těchto zónách nelze zaručit, že nedojde k překročení, avšak neznamená to, že jsou zde limitní hodnoty překračovány neustále, protože z principu vysílání systému mobilních sítí ani z jedna technologií GSM, UMTS, LTE nevysílá maximálně uvedeným výkonem trvale. Může však dojít k okamžiku, kdy všechny technologie budou vysílat maximálním výkonem [8].



Obrázek 1.14: Rozlišení oblastí pro limitní hygienické hodnoty[8]

#### 4.3 Plánování konfigurace anténního systému a připojení lokality

Pro každou základnovou stanici je potřeba vybrat vhodné antény, kdy se vychází hlavně z používané frekvence, prostorových možností, profilu terénu a potřebného zesílení. Dále je velmi

důležitá směrová charakteristika, jelikož většina základnových stanic využívá více kanálů a její vysílání je tedy rozděleno do několika sektorů. Pro určení všech potřebných parametrů se využívá softwarové simulace [8].

Dále je potřeba zařídit připojení základnové stanice do sítě daného telekomunikačního operátora, to lze realizovat více způsoby [8]:

- rádiovou infrastrukturou,
- metalickou infrastrukturou,
- optickou infrastrukturou.

Výběr pak závisí na dostupnosti v dané lokalitě, například pokud není možné realizovat připojení pomocí metalických nebo optických spojů, tak se využívá rádiové infrastruktury (to se týká nejčastěji horských lokalit apod.). Pokud je však na výběr, tak se nejčastěji volí optická infrastruktura, rozhoduje se však i na základě finanční dostupnosti [8].

### 4.4 Volba typu technologie

Typem technologie se v tomto případě myslí typ vysílací jednotky. V tomhle případě se nejčastěji rozhoduje na základě finanční dostupnosti jednotlivých technologií. Například pokud je vzdálenost mezi anténou a vysílací jednotkou příliš velká, tak by bylo potřeba koaxiálních kabelů s větším průřezem (tím se kompenzuje vzniklý útlum) a navíc by byl potřeba i předzesilovač, což by bylo nákladnější. V tomto případě se volí jednotka RRU (Remote Radio Unit), která se připojuje pomocí optických kabelů a není pak potřeba předzesilovače. Naopak nemusí být možné instalovat vnitřní skřín s jednotkami RFU (Remote Frequency Unit), nebo není možné tyto těžké jednotky uchytit na konstrukci k anténám [8].

### 4.5 Ověření funkčnosti

Když už je samotná výstavba základnové stanice hotová, tak je potřeba provést několik měření pro ověření funkčnosti. V tomto kroku je také potřeba vytvořit provozní řád, v němž jsou uvedeny bezpečnostní pokyny pro práci v dané lokalitě (ty zahrnují například bezpečné doby pobytů v blízkosti antén, bezpečnostní rizika, apod.). Nejčastěji se provádí následující měření [8]:

- měření koaxiálních kabelů (útlum kabelu včetně feederu, impedance kabelu v závislosti na délce, měření SWR),
- kontrola azimutů a náklonů antén,
- měření zprovozněného mikrovlnného spoje,
- funkčnost externích alarmů,
- revize elektrického zařízení, bezpečnostních a výstupových prvků.

### 4.6 Případná optimalizace

Po spuštění provozu základnové stanice se provádí tzv. drive test se speciálním softwarem, kde se ověřuje správná funkčnost např. handoveru a dalších funkcí. Dále se provádí periodické měření pomocí měřicího vozu, kdy se do notebooku nainstaluje specializovaný

software, notebook se následně propojí s mobilním telefonem pomocí USB (Universal Serial Bus) kabelu a poté se provádí měření. U každé základnové stanice se dále vyhodnocuje [8]:

- **CSSR** (Call Setup Success Rate) - udává procento úspěšně sestavených spojení
- **CBR** (Call Blocking Rate) - udává procento neúspěšně sestavených spojení
- **CDR** (Call Drop Rate)- udává procento přerušených již sestavených spojení

## 5 Technologie základnové stanice v laboratoři EB209

V předchozí kapitole bylo popsáno, jaké kroky doprovází výstavbu základnové stanice rádiových sítí 2. až 4. generace. Ve spolupráci s telekomunikačním operátorem T-Mobile byla jedna vybudována přímo v areálu VŠB a to v laboratoři EB209. Tato základnová stanice disponuje technologiemi GSM, UMTS, LTE a nb-IoT (Narrow Band - Internet of Things) a je mimo jiné používána i studenty pro některá měření ve výuce. Specifikace jednotlivých technologií jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 1.5: Konfigurace základnové stanice T-Mobile (VSBtest)

| Technologie   | Slot                | ARFCN/UARFCN/<br>EARFCN | BSIC/SCR<br>/PCI | CellId    |
|---------------|---------------------|-------------------------|------------------|-----------|
| <b>GSM</b>    | RFU0 (DRFU 900)     | 34 (941,8 MHz)          | 3                | 60139     |
|               | RFU1 (DRFU 900)     | 30 (941 MHz)            | 10               | 62109     |
| <b>UMTS</b>   | RFU3 (MRFUd 2100)   | 10836 (2167,2 MHz)      | 111              | 266181346 |
|               | RFU5 (MRFUd 2100)   | 10836 (2167,2 MHz)      | 150              | 266181356 |
| <b>LTE</b>    | RFU2 (LRFUe DD 800) | 6200 (796 MHz)          | 26               | 181089587 |
|               | RFU3 (MRFUd 2100)   | 449 (2154,9 MHz)        | 99               | 181089687 |
|               | RFU5 (MRFUd 2100)   | 449 (2154,9 MHz)        | 100              | 181896688 |
| <b>nb-IoT</b> | RFU2 (LRFUe DD 800) | 6247 (800,7 MHz)        | 26               | 181089757 |

Jednotlivé rádiové jednotky (údaje v závorkách ve sloupci "slot") pochází od firmy Huawei. DRFU 900 jsou RF moduly, které se nejčastěji instalují do vnitřních základnových stanic a slouží jako vysílací jednotky makro buněk. Obvykle se využívají v případě, kdy je potřeba jen malá nebo střední kapacita rádiové sítě a podporují maximálně dvě nosné. Číselné označení pak značí frekvenční pásmo, v kterém mohou pracovat a podporují pouze technologii GSM. Maximální vysílací výkon těchto modulů je 45 W v případě GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) modulace a 30 W v případě 8PSK (8-Phase Shift Keying). Moduly MRFUd 2100 mohou díky použití SDR (Software Defined Radio) pracovat v několika režimech a podporují tak technologie GSM, UMTS i LTE. Tyto jednotky dosahují maximálního výkonu až 80 W v případě technologie UMTS a až 60 W v případě LTE a pracují ve frekvenčním pásmu 2100 MHz. Poslední použité moduly LRFUe DD 800 pracují ve frekvenčním pásmu 800 MHz a slouží převážně k provozování technologie LTE. Tato jednotka využívá k oddělení downlinku a uplinku frekvenční oddělení (FDD). Maximální vysílací výkon je 60 W.[9]

Základnová stanice je dále vybavena pěti více-pásmovými směrovými anténami pro vnitřní využití od firmy Kathrein. Tyto antény pracují v pásmech 790 - 960 MHz a 1710 - 2700 MHz a mají vertikální polarizaci. Další technické specifikace použitých antén jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 1.6: *Technické specifikace antény Kathrein 1-port Indoor 790–960/1710–2700 C 90° 7dBi [10]*

|                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| <b>Zisk</b>             | 7 dBi                          |
| <b>Impedance</b>        | 50 $\Omega$                    |
| <b>VSWR</b>             | 790 – 806 MHz: < 2,2           |
|                         | 806 – 960 MHz: < 2,0           |
|                         | 1710 – 2700 MHz: < 2,0         |
| <b>Maximální výkon</b>  | 50 W (při okolní teplotě 50°C) |
| <b>Vstupní konektor</b> | N (samice)                     |



Obrázek 1.15: *Základnová stanice v laboratoři EB209*



## 6 Návrh metodiky

V následující kapitole popíšu navrženou metodiku pro posuzování kvality příjmu signálu GSM, UMTS a LTE. Dále budu popisovat vytvořené měřící pracoviště, použité přístroje a nástroje a jejich nastavení. Navržená metodika bude obsahovat dvě části:

- Testování vlivu kvality signálu na hlasové hovory
- Testování vlivu kvality signálu na datové přenosy

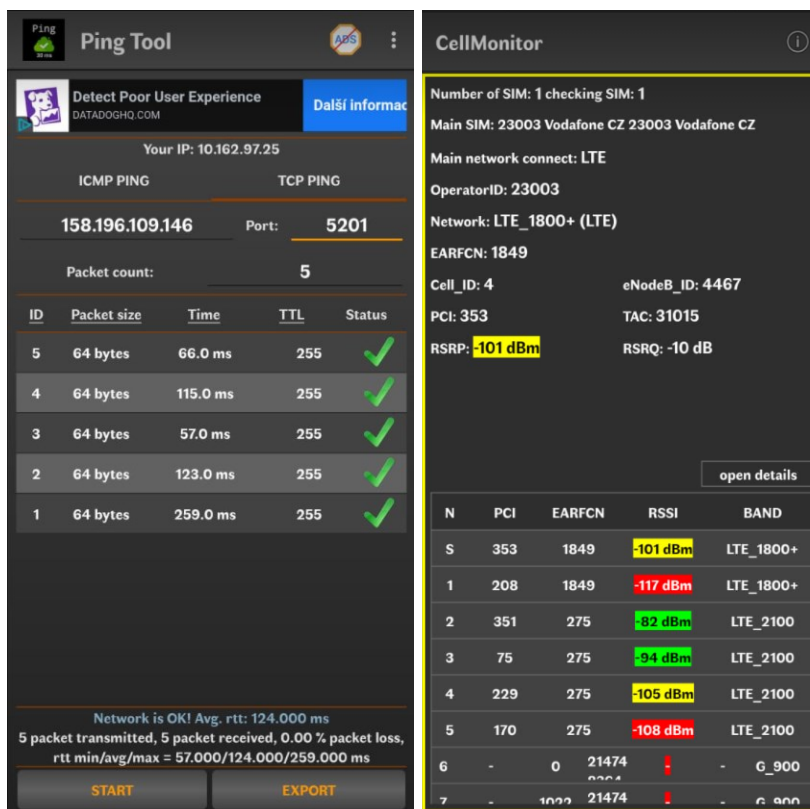
V první řadě bylo potřeba navrhnout, jakým způsobem budou obě části realizovány, kdy hlavně v případě hlasových hovorů, bylo nutné zvolit objektivní způsob testování. Hlavní způsob klasifikace kvality hovorů se v telekomunikacích využívá ohodnocení MOS (Mean Opinion Score), které testovaným hlasovým hovorům přiřazuje číselné označení od 1 do 5, kdy 1 značí nejhorší kvalitu a 5 tu nejlepší. MOS je však subjektivní metodou a výslednou hodnotu přiřazují nezávislí posluchači. Stupnice MOS je však nejlepší možností jak testované hovory evaluovat. Aby ohodnocení bylo objektivní, tak pro testování použiji algoritmus PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), který porovnává dva zvukové záznamy - referenční a testovaný. Tento algoritmus je standardizován doporučením ITU-T s označením P.862 a výstupní hodnota MOS není zatížena subjektivním rozhodnutím posluchače. Pro testování jsem proto vytvořil referenční audio soubor, který bude přehráván v hlasovém hovoru. Hovor pak bude nahráván a následně aplikuji na obě zvukové stopy algoritmus PESQ. Provedené hovory budu nahrávat připojením audio výstupu mobilního telefonu do vstupu pro mikrofon na zvukové kartě počítače a samotné nahrávání bude realizováno pomocí volně dostupného softwaru Audacity. Nahrávku bude následně potřeba zpracovat tak, aby uložený zvukový soubor odpovídal tomu referenčnímu a bylo možné provést analýzu PESQ. Audio soubory budu ukládat ve formátu obsahující model testovaného telefonu, testovaná technologie a přijímaná úroveň v dBm (tato hodnota bude vždy záporná, proto to v názvu souboru uvádět nebudu), například takto:

Pixel2\_GSM\_82

Dále bylo potřeba navrhnout, jakým způsobem bude referenční audio soubor přehráván v hlasovém hovoru a pro tento účel jsem zvolil pobočkovou ústřednu Asterisk, protože jedna z jeho funkcionalit je možnost vytvoření IVR (Interactive Voice Respon) systému. Asterisk je ovšem ústřednou pro VoIP (Voice over IP) aplikace, proto aby bylo možné vytvořit hovor s mobilním zařízením, tak jsem musel vytvořit gateway skrze USB modem a modul Chan-Dongle sloužící k propojení Asterisku s rádiovými sítěmi typu GSM, UMTS a LTE.

V případě testování vlivu kvality přijímaného signálu na datové přenosy byl návrh podstatně jednodušší. Hlavním důvodem byla možnost měřit kvalitativní parametry, jako jsou download, upload nebo časová odezva. Proto bylo potřeba jen zvolit jakým způsobem tyto parametry měřit. V úvahu přišla některá z měřících aplikací dostupná ke stažení do mobilního telefonu, avšak v tomto případě probíhá měření s některým již k tomuto účelu vytvořeným serverem, které se můžou nacházet po celém světě. Proto jsem pro měření zvolil nástroj iPerf3, který dovoluje jednoduché vytvoření vlastního serveru. Tento server se nachází ve školní síti a

proto download ani upload nebude ovlivněn vzdáleností od serveru (respektive počtu síťových prvků mezi mobilním telefonem a serverem). Naneštěstí nástroj iPerf3 nepodporuje měření odezvy a proto ji budu měřit odděleně. Jelikož iPerf3 měří rychlost připojení přes TCP spojení, tak využijeme volně dostupnou aplikaci Ping Tool podporující TCP ping na specifický port (v případě spuštěného iPerf3 serveru se jedná o port 5201).



Obrázek 1.16: Ukázka aplikací Ping Tool (vlevo) a Cell Monitor (vpravo)

Nakonec bylo potřeba už jen navrhnout, jakým způsobem bude měřena přijímaná úroveň signálu v mobilním zařízení. Mým původním plánem bylo ji měřit pomocí možnosti v nastavení telefonu zobrazit stav SIM karty, jenže v tomto případě bych věděl jen jaká je hodnota signálu a nebylo by možné zjistit, jestli je telefon připojen na správnou buňku rádiové sítě. Z tohoto důvodu jsem zvolil další volně dostupnou aplikaci (podobných aplikací je k dispozici nespočet) a to aplikaci CellMonitor, která zobrazuje nejen přijímanou úroveň signálu, ale také číselné označení buňky a další informace. Pro měření jednotlivých technologií pak využiji možnosti v nastavení mobilních zařízení, kdy je možné preferovat určité technologie - pouze 2G, 3G a UMTS.

Pro shrnutí základními prvky měření budou testovaný mobilní telefon, základnová stanice dostupná na Fakultě elektrotechniky a informatiky v laboratoři EB209, pobočková ústředna Asterisk realizována pomocí zařízení Raspberry Pi 3 model B a GSM-VoIP gateway realizován pomocí Asterisk modulu Chan-Dongle a USB modemu Huawei K3765, nástroj iPerf3 a PESQ analýza audio souborů.

## 6.1 Měřicí pracoviště

V této části popíšu, jak vypadá měřicí pracoviště pro navrženou metodiku. Krom výše uvedených přístrojů a nástrojů je potřeba tří přístrojů dostupných v laboratoři EB209:

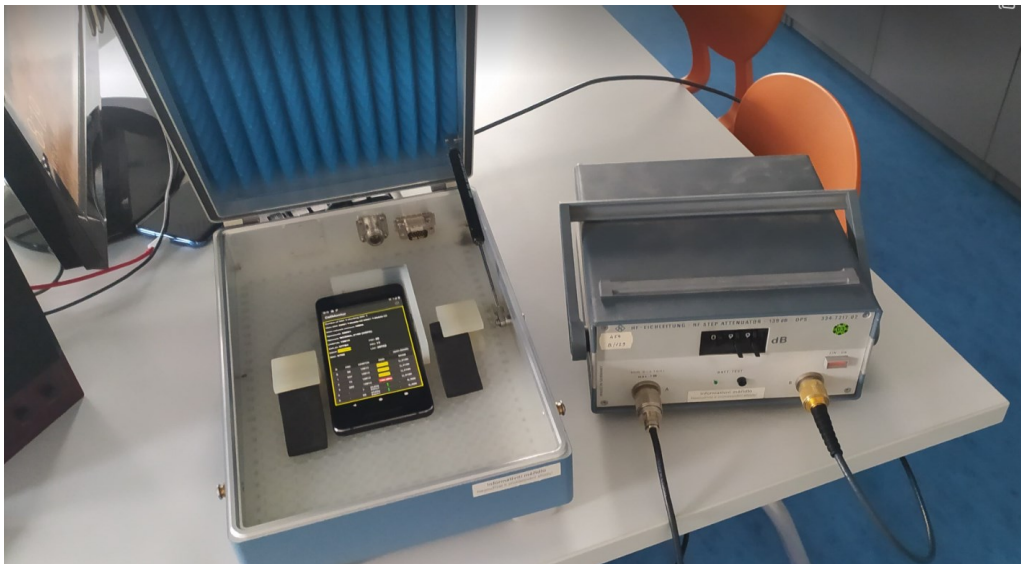
- Nastavitelný útlumový článek - HF-EICHLEITUNG RF STEP ATTENUATOR
- Útlumový článek s útlumem 30 dB
- Bezodrazový box R&S CMU Z-11 s propojovací jednotkou R&S CMU Z-10

Nastavitelný útlumový článek je zapotřebí k tomu, aby bylo možné postupně měnit přijímanou úroveň signálu - maximální útlum tohoto článku je 139 dB. Mobilní zařízení pak bude během měření vloženo do bezodrazového boxu, aby nedocházelo k chybám měření způsobených vnějšími vlivy. Do propojovací jednotky jsem následně přes nastavitelný útlumový článek připojil výstup ze základnové stanice. Kdybych ho však připojil na přímo, tak by došlo ke zničení testovaného mobilního zařízení z důvodů velkého vysílacího výkonu, zároveň nebylo možné připojit výstup ze základnové stanice ani do nastavitelného útlumového článku, na jehož vstup lze připojit maximálně 1 W. Z tohoto důvodu jsem na výstup nejdříve připojil konstantní útlumový článek s útlumem 30 dB a až následně jsem celou sestavu propojil postupně s každou testovanou technologií.



Obrázek 1.17: Připojení útlumového článku s útlumem 30 dB na výstup základnové stanice

Výstup konstantního útlumového článku jsem následně připojil na nastavitelný útlumový článek a jeho výstup pak do propojovací jednotky R&S CMU Z-10, ta má navíc uzavíratelný otvor, který se dá prostrčit audio kabel, který bude připojen do mobilního zařízení. Výsledné měřicí pracoviště pak vypadá následovně:



Obrázek 1.18: Měřicí pracoviště

## 6.2 Testované mobilní zařízení

Pro testování využiji dva mobilní telefony hlavně proto, aby bylo možné vzájemně porovnat naměřené hodnoty. K dispozici pro měření jsem měl následující mobilní zařízení:

- **Google Pixel 2** - jedná se o mobilní telefon s operačním systémem Android 11 s 8-jádrovým procesorem Qualcomm Snapdragon 835 (taktovací frekvence 2 GHz), paměti RAM o velikosti 4 GB a vnitřní paměti 64 GB. Tento telefon byl uveden na trh koncem roku 2017.
- **Xiaomi Redmi Note 8T** - jedná se o mobilní telefon s operačním systémem Android 10 s 8-jádrovým procesorem Qualcomm Snapdragon 665 (taktovací frekvence 2 GHz), paměti RAM o velikosti 4 GB a vnitřní paměti 64 GB. Tento telefon byl uveden na trh koncem roku 2019.

## 6.3 Raspberry Pi 3 model B

Jedná se o 3 generaci jednodeskových mikropočítačů založený na platformě ARM (Advanced RISC Machine), který přináší výkonnější procesor. Podporuje mnoho operačních systémů a v případě navržené metodiky budu využívat operační systém Raspberry Pi OS, který je založený na Linuxu. Obsahuje 4-jádrový procesor Broadcom Quad-Core BCM2837 s taktovací frekvencí 1,2 GHz a paměť RAM o velikosti 1 GB. Dále obsahuje jednu ethernetovou přípojku, čtyři USB 2.0 vstupy, HDMI (High Definition Multimedia Interface) výstup a čtečku paměťových karet. Podporuje připojení k Wi-Fi a disponuje technologií Bluetooth. V případě navržené

metodiky využiji tento mikropočítač ve spojení s USB modemem jako IVR systém, který vyzvedne příchozí hovor a přehraje v něm testovací audio soubor.



Obrázek 1.19: *Raspberry Pi 3 model B s připojeným USB modemem K3765*

### 6.4 Asterisk a Chan-Dongle

Chan-Dongle je modul pro open-source softwarovou pobočkovou ústřednu Asterisk, kterou je možné instalovat na standartních počítačích (nejčastěji s operačním systémem Linux). V případě mého měření bude sloužit jako gateway mezi Asteriskem a rádiovými sítěmi GSM, UMTS a LTE pro testování vlivu signálu na hlasové hovory. Dalším důležitým prvkem pak bude USB modem Huawei K3765 Vodafone (v průběhu zpracovávání diplomové práce tento modem přestal pracovat, proto jsem pokračoval s modemem Huawei E3131), který podporuje připojení do sítě výše uvedených technologií.



Obrázek 1.20: *Huawei K3765 Vodafone USB modem*

Nejdříve je potřeba připravit používaný USB modem tak, aby bylo možné provádět na něj hlasové hovory. K tomu jsem využil AT příkaz `AT+CVOICE=0`, čímž se hlasové hovory

povolí. V případě modemu Huawei E3131 bylo navíc potřeba explicitně nadefinovat telefonní číslo vložené SIM karty. Modem se sice správně propojil s modulem Chan-Dongle, avšak zmíněný modul nemohl automaticky zjistit telefonní číslo. To bylo možné provést pomocí následujících AT příkazů:

```
AT+CPBS="ON"
```

```
AT+CPBW=1,"+420737008089",,"Voice"
```

Dále bude tedy potřeba nainstalovat na Raspberry PBX Asterisk a následně i přídatný modul Chan-Dongle. Asterisk lze nainstalovat z linuxových repozitářů, avšak v případě Chan-Dongle je potřeba získat instalační balíček v zip souboru z githubu. Navíc pro správnou instalaci je potřeba nainstalovat i balíček asterisk-dev, který obsahuje vývojářské soubory Asterisku (ty je potřeba, pokud chceme nainstalovat balíček, který vyžaduje záhlaví zdrojových souborů Asterisku). V případě, že nemáme nainstalované některé základní balíčky (jako jsou např. *wget*, *make*, *automake* apod.), tak je potřeba je doinstalovat. Následnou instalaci lze provést pomocí následujících příkazů:

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install asterisk asterisk-dev
```

```
wget https://github.com/bg111/asterisk-chan-dongle/archive/master.zip
```

```
unzip master.zip
```

```
cd asterisk-chan-dongle-master
```

```
aclocal && autoconf && automake -a
```

```
./configure
```

```
make
```

```
make install
```

Po instalaci nakonfigurujeme Chan-Dongle pomocí konfiguračního souboru *dongle.conf*, který nalezneme ve složce */etc/asterisk/*. Tento konfigurační soubor obsahuje ukázkou, jak by měl vypadat. Nechám ho tedy tak, jak je připravený a upravím jen následující řádky:

```
[dongle0]
```

```
;audio=/dev/ttyUSB
```

```
;data=/dev/ttyUSB2
```

```
imei=355645041003040
```

```
imsi=230015003017676
```

Řádky s informací *audio* a *data* byly předtím používané jako primární připojení k USB modemu, ty však zakomentuji a použiji místo toho připojení k modemu pomocí jeho čísla IMEI

a IMSI vložené SIM karty. Tím mám připravenou gateway přes USB modem a posledním krokem k dokončení konfigurace je úprava souboru *extensions.conf*. V tomto souboru upravíme kontext default, kam je potřeba přidat následující řádky:

```
exten => _+X.,1,Verbose("Spojení bylo úspěšně navázáno.")
exten => _+X.,n,Answer(5000)
exten => _+X.,n,Playback(test_audio)
exten => _+X.,n,Wait(1)
exten => _+X.,n,Hangup()
```

Aby Asterisk rozpoznal příchozí hovor na USB modem, tak je potřeba mu nadefinovat telefonní číslo vložené SIM karty. Abych nemusel telefonní číslo explicitně vypisovat, tak jsem použil označení "+X.":

- + značí, že telefonní číslo bude začínat předvolbou, respektive značkou '+'
- X značí, že telefonní číslo bude obsahovat číslici od 0 do 9
- . značí, že po první číslici bude následovat několik dalších

První řádek pouze vypíše do konzole Asterisku větu uvedenou v závorkách a slouží pouze k ověření, že se povedlo vytvořit spojení mezi testovaným mobilním telefonem a USB modemem. Následující řádek pak vyzvedne příchozí hovor se zpožděním 5 sekund. Tuto dobu jsem do nastavení přidal ze dvou důvodů - bude jednodušší pak oddělit přehrávaný audio soubor v nahrávce hovoru a budu mít čas k uzavření odstíňovací komory, ve které bude testovaný telefon uložen. Po uplynutí dané lhůty se spustí přehrávání testovacího audio souboru *test\_audio.gsm* (příkaz *Playback*) a následně Asterisk počká 1 sekundu a hovor ukončí (příkazy *Wait* a *Hangup*). Výše uvedenými kroky byla brána připravena k používání a je možno začít testovat kvalitu hlasových hovorů v závislosti na kvalitě přijímaného signálu.

## 6.5 Vytvoření testovacího audio souboru

Pro testování hlasových hovorů jsem vytvořil krátký testovací audio soubor, který bude následně přehráván pomocí SW PBX Asterisk ve vytvořeném hovoru. Pro vytvoření jsem využil nástroj, který převádí napsaný text do MP3 (MPEG-2 Audio Layer III) souboru. Tento nástroj je volně dostupný na webové stránce [www.ttsmp3.com](http://www.ttsmp3.com). Dle ITU-T P862.3 [14] musí soubor mít délku 8-30s, obsahovat 40-80% aktivní řeči a před PESQ analýzou musí být společně s testovaným audiem ekvalizován v úrovni (vytvořený audio soubor má 21 sekund a dle ITU-T P.56 [15] obsahuje 76,5% aktivní řeči). Dále je potřeba aby na začátku a na konci nebylo ticho delší než 2 sekundy a věty by měly být odděleny pauzou, jako tomu je u klasické řeči. Vytvořený audio soubor pak bylo potřeba překonvertovat do dvou formátů:

- WAV (Waveform Audio File Form) se vzorkovací frekvencí 8000 Hz - tento formát a vzorkovací frekvence je potřeba pro následnou PESQ analýzu.
- GSM 6.10 FR se vzorkovací frekvencí 8000 Hz - tento formát je potřebný pro možnost přehrávání v hlasovém hovoru pomocí SW PBX Asterisk. Max. MOS - 3,6 [13].



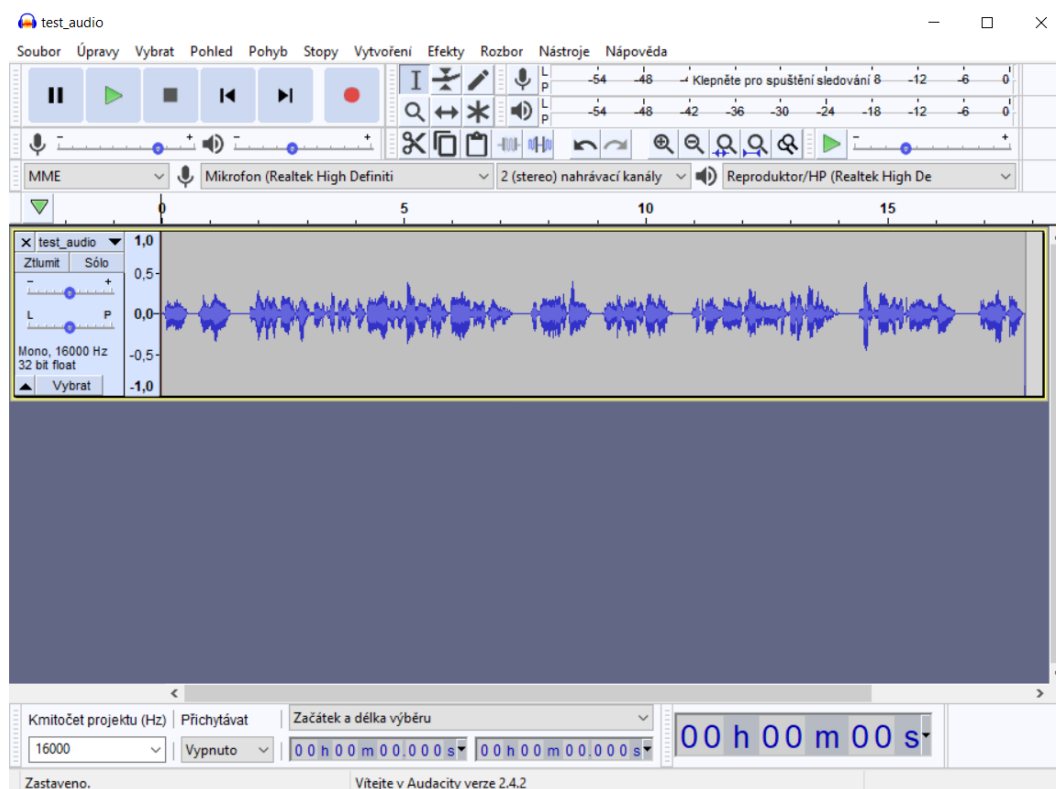
Audio soubor jsem nejprve převedl na formát WAV pomocí programu Audacity, kde je možné změnit i vzorkovací frekvenci. Tento software však nepodporuje převod do formátu GSM, proto jsem následně využil linuxový nástroj sox (ten využívá defaultně GSM FR). Nejprve jsem tedy tento nástroj nainstaloval na Raspberry Pi 3 a následně lze provést konverzi:

```
sudo apt install sox
```

```
sox test_audio.wav -r 8000 test_audio.gsm
```

## 6.6 Nahrávání hovorů

Nahrávání hlasových hovorů pro navrženou metodiku provedu připojením audio výstupu mobilního zařízení do vstupu mikrofону zvukové karty klasického stolního počítače. Následně spustím software Audacity pomocí kterého hovory budu následně nahrávat. Nahrané audio následně oříznu pouze na část hovoru s přehrávaným testovacím audiem. Pro jednodušší zpracování bude v hovoru před i po této části pouze ticho, což jsem zařídil nastavením Asterisku. Nahrávku následně uložím ve formátu WAV se vzorkovací frekvencí 8000 Hz.



Obrázek 1.21: Ukázka rozhraní softwaru Audacity

## 6.7 PESQ analýza nahraných hovorů

Na nahraných hlasových hovorech následně provedu PESQ analýzu pomocí doporučení ITU-T P.862 [11]. Toto doporučení popisuje objektivní metodu pro určení subjektivního ohodnocení hovorů pomocí stupnice MOS. Na oficiálních stránkách ITU-T jsou dostupné



zdrojové soubory nástroje pro PESQ analýzu, které pro navrženou metodiku využijí. Tento nástroj podporuje pouze audio se vzorkovací frekvencí 8000 Hz a 16000 Hz. Před samotnou analýzou je nejprve potřeba tento nástroj připravit pro použití. Stažené zdrojové soubory tedy nahrají na linuxový server v souboru pesq.zip a provedu následující příkazy:

```
cd P862_annex_A_2005_CD/source
```

```
gcc -o PESQ *.c -lm
```

Posledním zmíněným příkazem zkompiluji všechny zdrojové soubory do binárního souboru PESQ. Pro spuštění je potřeba tomuto binárnímu souboru předat tři argumenty - vzorkovací frekvenci, referenční audio soubor a testovaný audio soubor:

```
./PESQ +8000 referenci.wav testovany.wav
```

```
Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)
Reference implementation for ITU-T Recommendations P.862, P.862.1 and P.862.2.
Version 2.0 October 2005.
```

```
PESQ Intellectual Property Rights Notice.
```

```
*****
* OPTICOM GmbH                                * Psytechnics Limited                *
* Naegelsbachstr. 38,                        * Fraser House, 23 Museum Street, *
* D- 91052 Erlangen, Germany                 * Ipswich IP1 1HN, England        *
* Phone: +49 (0) 9131 53020 0                 * Phone: +44 (0) 1473 261 800     *
* Fax:   +49 (0) 9131 53020 20                 * Fax:   +44 (0) 1473 261 880     *
* E-mail: info@opticom.de,                   * E-mail: info@psytechnics.com,   *
* www.opticom.de                             * www.psytechnics.com            *
*****
```

```
Reading reference file referenci.wav...done.
```

```
Reading degraded file testovany.wav...done.
```

```
Level normalization...
```

```
IRS filtering...
```

```
Variable delay compensation...
```

```
Acoustic model processing...
```

```
P.862 Prediction (Raw MOS, MOS-LQO): = 2.009 1.639
```

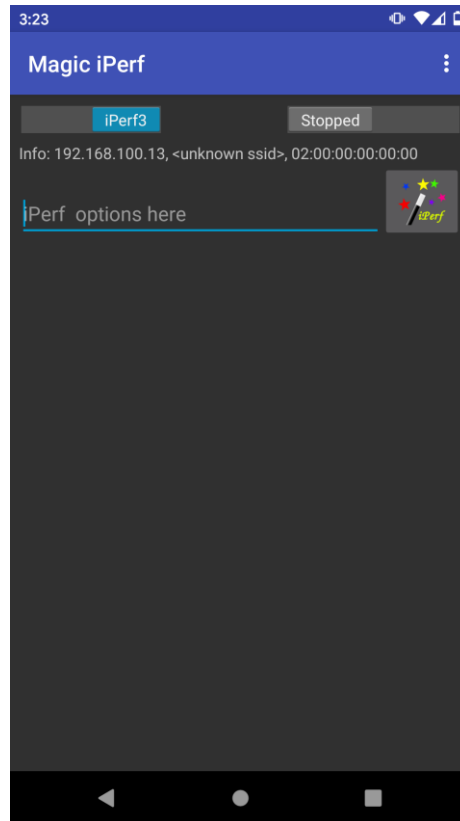
Obrázek 1.22: Ukázka výstupu PESQ analýzy

Pro vyhodnocení změny kvality hovorů v závislosti na kvalitě přijímaného signálu využijí výsledek PESQ analýzy označený MOS-LQO (MOS - Listening Quality Objective). Jedná se tedy o objektivní poslechovou kvalitu analyzovaných audio souborů.

## 6.8 iPerf 3

Jedná se o volně dostupný softwarový nástroj pro měření maximální propustnosti IP sítě a je dostupný pro všechny platformy jako je Android, iOS, Linux, Windows a další. Funguje na principu komunikace klient-server, kdy v mém případě klientem bude testovaný mobilní telefon a server bude virtuální stroj s operačním systémem Linux a veřejnou IP adresou 158.196.109.146.

Při výchozím nastavení komunikace probíhá tak, že klient odesílá data na server a pokud využijeme přepínače -R, tak bude odesílat data server klientovi. Pro mobilní zařízení je potřeba stáhnout aplikaci dostupnou v Google Play (Magic iPerf), popřípadě Apple Store (iPerf - Speed Test Tool).



Obrázek 1.23: Ukázka rozhraní aplikace Magic iPerf

Tento nástroj je součástí linuxových repositářů, takže na virtuálním stroji se nainstaluje pomocí příkazu:

```
apt install iperf3
```

Po nainstalování nejprve spustíme iPerf3 server na virtuálním stroji pomocí následujícího příkazu:

```
iperf3 -s -f k
```

Přepínač -s značí iperf3 server a vytvořená server naslouchá na portu 5201. Díky přepínače -f s hodnotou 'k' bude naměřená rychlost uvedena v kilobitech za sekundu (v případě technologií UMTS a LTE použijí hodnotu 'm', kdy naměřená rychlost bude uvedena v Mbit/s). Na klientské části pak spustíme iPerf3 pomocí následujících dvou příkazů:

```
iperf3 -c 158.196.109.146 -O 10
```

```
iperf3 -c 158.196.109.146 -O 10 -R
```

V tomto případě značí přepínač `-c` iPerf3 klienta a díky přepínače `-O` s hodnotou `'10'` přeskočíme prvních 10 sekund měření kvůli pomalému startu TCP spojení a také proto, aby bylo dostatek času uzavřít bez odrazový box a měření tak nebylo zatíženou chybou. Prvním příkazem pak budu měřit upload mobilního zařízení a druhým příkazem zase download (přepínač `-R` značí reverzní režim). Měření propustnosti pak vypíše do konzole rychlost připojení během každé sekundy měření (celkem jedno měření trvá 10 sekund + 10 sekund, které budou přeskočeny) a na konci výstupu budou vypsány dvě celkové rychlosti připojení:

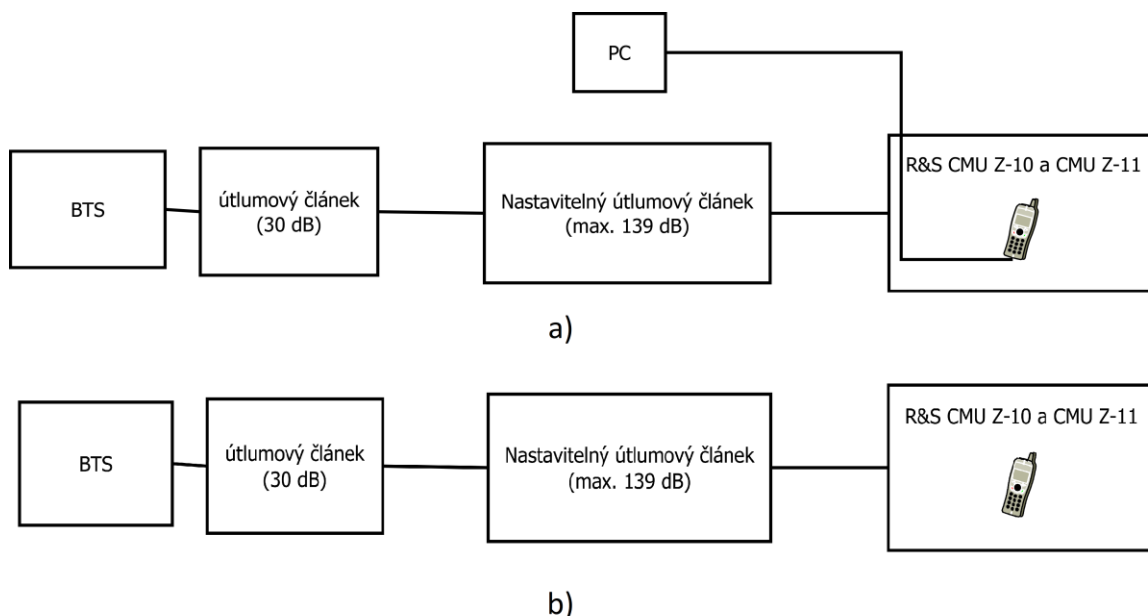
- **Sender** - tato hodnota bude důležitá v případě měření uploadu (v případě reverzního režimu tento údaj reprezentuje rychlost uploadu serveru)
- **Receiver** - tato hodnota bude důležitá v případě měření downloadu (v případě klasického režimu se jedná o download serveru)

```
-----
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 10.11.12.1, port 32615
[ 5] local 10.11.12.181 port 5201 connected to 10.11.12.1 port 32589
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth
[ 5]  0.00-1.00      sec  2.55 MBytes  21428 Kbits/sec      (omitted)
[ 5]  1.00-2.00      sec  3.00 MBytes  25126 Kbits/sec      (omitted)
[ 5]  2.00-3.00      sec  3.00 MBytes  25171 Kbits/sec      (omitted)
[ 5]  3.00-4.00      sec  2.87 MBytes  24039 Kbits/sec      (omitted)
[ 5]  0.00-1.00      sec  3.29 MBytes  27576 Kbits/sec
[ 5]  1.00-2.00      sec  3.04 MBytes  25468 Kbits/sec
[ 5]  2.00-3.00      sec  3.23 MBytes  27056 Kbits/sec
[ 5]  3.00-4.00      sec  3.16 MBytes  26512 Kbits/sec
[ 5]  4.00-5.00      sec  3.40 MBytes  28494 Kbits/sec
[ 5]  5.00-6.00      sec  3.22 MBytes  27045 Kbits/sec
[ 5]  6.00-7.00      sec  3.56 MBytes  29826 Kbits/sec
[ 5]  7.00-8.00      sec  3.39 MBytes  28409 Kbits/sec
[ 5]  8.00-9.00      sec  3.54 MBytes  29686 Kbits/sec
[ 5]  9.00-10.00     sec  3.44 MBytes  28879 Kbits/sec
[ 5] 10.00-10.11     sec   421 KBytes  31369 Kbits/sec
-----
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth
[ 5]  0.00-10.11     sec  33.4 MBytes  27724 Kbits/sec      sender
[ 5]  0.00-10.11     sec  33.7 MBytes  27933 Kbits/sec      receiver
```

Obrázek 1.24: Ukázka výstupu měření datové propustnosti na straně serveru (přeskočeny jsou pouze první 4 sekundy měření)

## 6.9 Postup měření

V následující podkapitole popisují postup celého měření jak pro testování datových přenosů, tak i hlasových hovorů. Nejdříve je potřeba zapojit měřicí pracoviště dle následujícího obrázku (pro testování hlasových hovorů je potřeba částečně odšroubovat krycí destičku v zadní části bezodrazového boxu):



Obrázek 1.25: Diagram zobrazující zapojení měřicího pracoviště: a) pro testování hlasových hovorů, b) pro testování datových přenosů

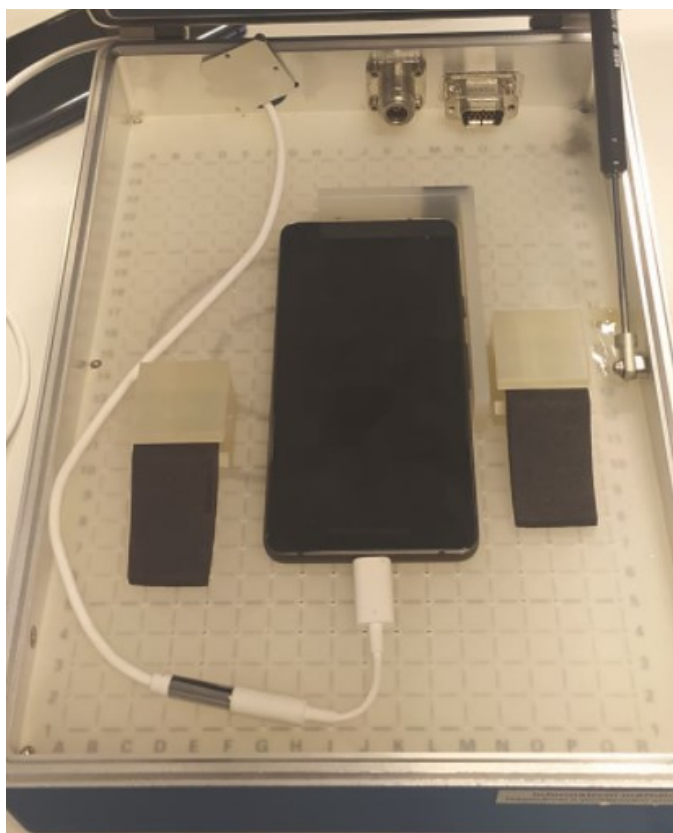
Na mobilním zařízení je potřeba nastavit preferovaný typ sítě (Nastavení -> SIM karty a mobilní síť -> "Název vložené SIM karty" -> Preferovaný typ sítě) na jednu z technologií. Dle vybrané technologie je dále potřeba připojit pracoviště na odpovídající výstup dle měřené technologie. Ostatní vysílací jednotky stejné technologie je nutné odpojit (základnová stanice obsahuje dvě jednotky GSM atd.), jinak by působily rušivě. Jak je zobrazeno výše, mobilní zařízení je uloženo do bezodrazového boxu a spustím aplikaci Cell Monitor, pomocí které je měřena přijímaná úroveň signálu. Box uzavřu a po chvíli (zhruba 10 - 20 sekund) znovu otevřu a odečtu přijímanou úroveň signálu - úroveň signálu se po chvíli změní, proto je potřeba ji odečíst ihned po otevření boxu, jinak by hodnoty neodpovídali naměřeným datům. V případě testování datových přenosů (ty je lepší měřit první, jelikož není potřeba upravovat bezodrazový box), je postup následující:

- Spustím iPerf3 server a v aplikaci Magic iPerf nejdříve pomocí příslušného příkazu spustím test downloadu a box uzavřu.
- Stejný postup opakuji i pro upload a následně pomocí aplikace pro ping i pro odezvu.
- Pomocí nastavitelného útlumového článku nastavím nižší úroveň signálu, tu zase odečtu z aplikace Cell Monitor.
- Naměřené hodnoty downloadu a uploadu odečítám z rozhraní serveru, odezvu je však potřeba odečíst z aplikace pro ping.
- Předchozí body opakuji, dokud je možné navázat spojení s iPerf3 serverem.
- Takhle opakuji měření pro všechny technologie. Je potřeba změnit preferovaný typ sítě a přepojit na výstup základnové stanice dle technologie.

Následně připravím pracoviště pro testování hlasových hovorů, tedy je potřeba připojit audio výstup zařízení do audio vstupu počítače. Jak bylo výše zmíněno, k tomu je nutné částečně

odšroubovat kryt na zadní straně bezodrazového boxu. Na zadní straně je taktéž konektor pro připojení datového kabelu a slouží převážně pro ovládání testovaného zařízení. Konektor však neodpovídá žádnému audio konektoru a bylo by, proto nutné vytvořit redukci. Ta by však mohla degradovat nahrávky a ovlivnit hodnoty MOS. Spustím Audacity a postupuji následovně:

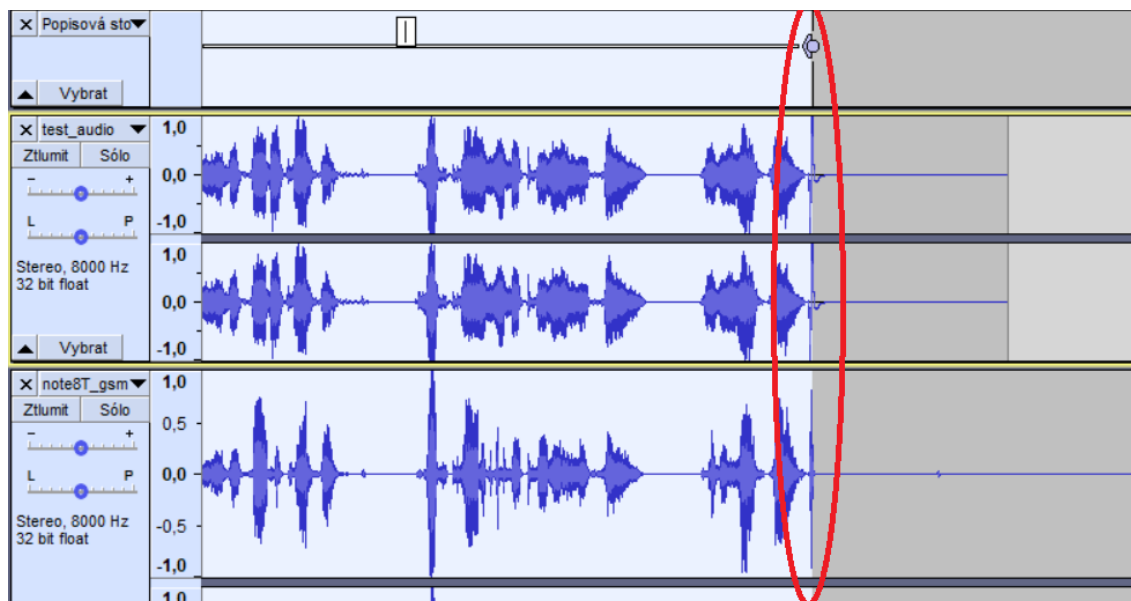
- Provedu hovor na vytvořenou bránu a na počítači v softwaru Audacity spustím nahrávání.
- Po skončení hovoru nahrávání ukončím a nahrávku uložím.
- Pomocí nastavitelného útlumového článku snížím přijímanou úroveň signálu, kterou odečtu z aplikace Cell Monitor.
- Výše zmíněné body opakuji, dokud je mobilní zařízení připojeno na rádiovou buňku základnové stanice v laboratoři.
- Po změření změním preferovaný typ sítě a celé měření opakuji pro další technologii.



Obrázek 1.26: *Připojení mobilního zařízení k PC pro nahrávání hovorů*

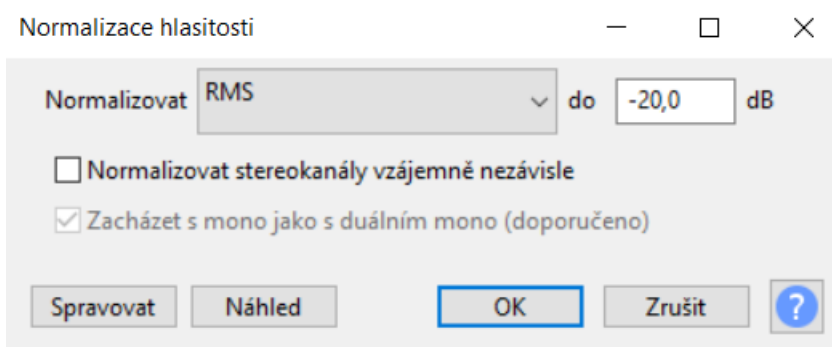
Posledním krokem je zpracování nahraných hlasových hovorů pomocí softwaru Audacity, kam nejprve vložím všechny nahrávky včetně referenčního audio souboru. Následně je všechny synchronizuji za pomoci synchronizační amplitudy, vložené na konec audio souboru. K tomu potřebuji vytvořit marker na tuto amplitudu (Úpravy -> Štítky -> Přidat štítek k výběru), aby synchronizace byla následně jednodušší. Po tomto marker si označím všechny stopy v projektu

a následně každou pomocí nástroje pro časový posun posunu tak, aby poslední amplituda ukončovala výběr.



Obrázek 1.27: Synchronizace nahrávek

Po synchronizaci je potřeba nahrávky zkrátit na stejnou délku jako je ta referenčního audia. To lze provést označením stejného časového úseku každé nahrávky jako je délka referenčního audio souboru a následně použitím nástroje pro ořez zvuku mimo výběr. Nakonec je potřeba všechny stopy (včetně referenční) ekvalizovat v úrovni hlasitosti. Označím tedy všechny nahrávky pomocí klávesové zkratky Ctrl+A a použiji efekt pro normalizaci hlasitosti (Efekty -> Normalizace hlasitosti...). V nastavení tohoto efektu zvolím možnost RMS a ponechám výchozí nastavení. Možnost "normalizovat kanály vzájemně nezávisle" musí být nezaškrtnutá, jinak by úroveň hlasitosti nebyla u všech stop stejná.



Obrázek 1.28: Nastavení normalizace hlasitosti

Výše uvedenými kroky jsou nahrávky připraveny pro PESQ analýzu, uložím je tedy všechny najednou pomocí možnosti uložit více souborů ve formátu WAV (Soubor -> Uložit v jiném formátu -> Uložit více souborů jako...). Nahrávky nahraji na server a provedu PESQ analýzu.

## 7 Analýza výsledků

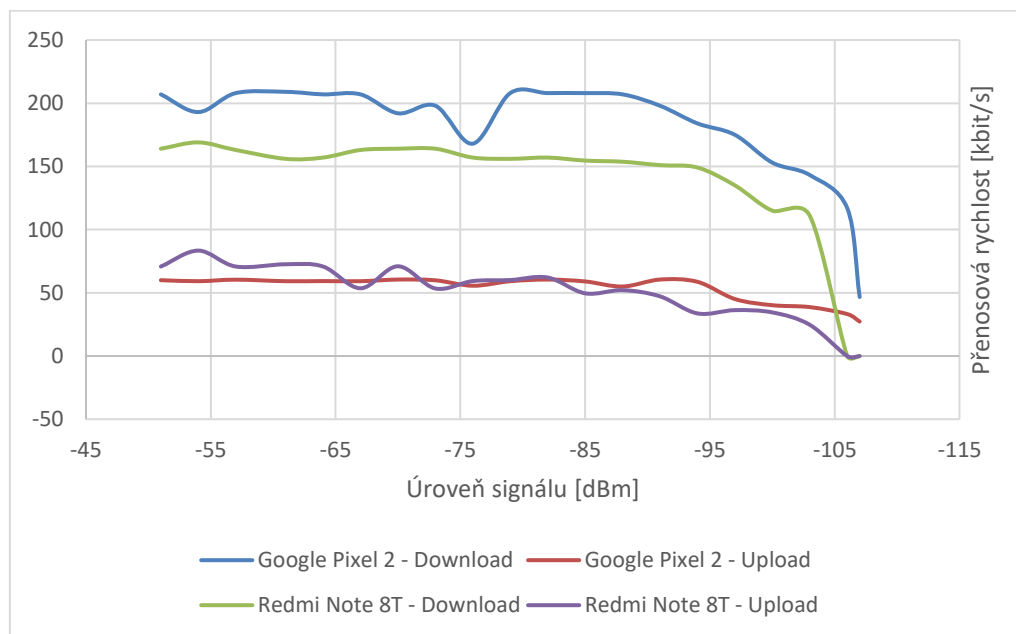
V následující kapitole popíšu výsledky provedených měření na základě navržené metodiky. Uvádím zde pouze grafické znázornění naměřených hodnot, výčet hodnot je uveden v přílohách diplomové práce. Právě z grafických znázornění je rozdíl patrnější.

### 7.1 Testování datových přenosů

V této části budou porovnány naměřené hodnoty datových přenosů jednotlivých zařízení pro technologie GSM, UMTS a LTE.

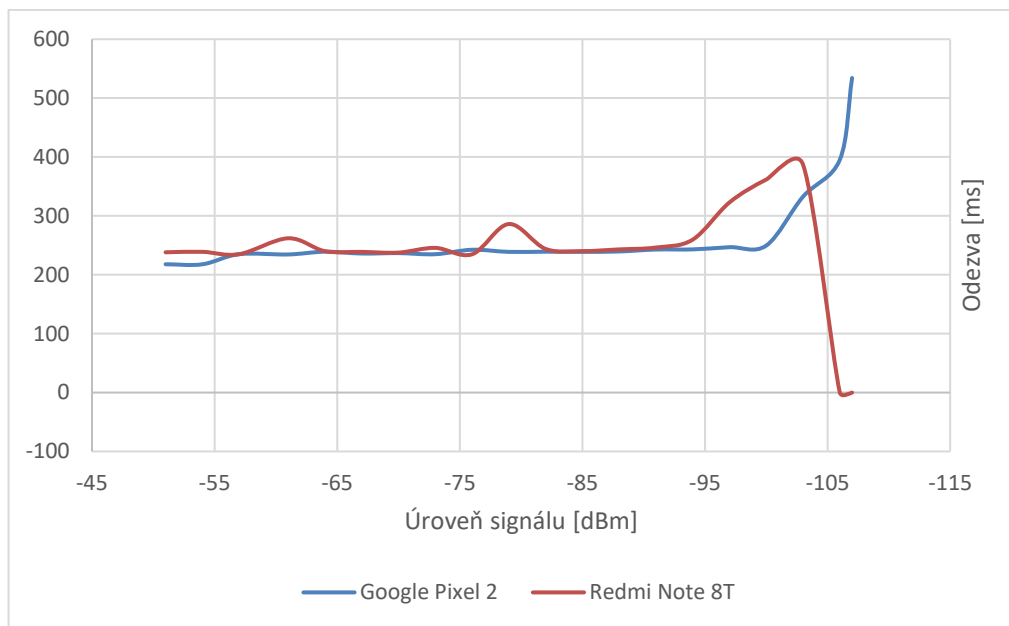
#### 7.1.1 GSM

Následující graf ukazuje rozdíl mezi přenosovými rychlostmi měřených mobilních zařízení Google Pixel 2 a Xiaomi Redmi Note 8T u technologie GSM. Lze vidět, že v případě této technologie je Google Pixel 2 o něco méně citlivý na změnu přijímaného signálu, kdy při úrovni signálu menší než -103 dBm již nebylo možné navázat spojení se serverem. Google Pixel 2 rovněž v případě downloadu dosahoval vyšších přenosových rychlostí. Pozorovatelné občasné výkyvy přenosových rychlostí, pak mohou být způsobeny aktuálním stavem rádiové sítě.



Obrázek 1.29: Graf naměřených přenosových rychlostí technologie GSM

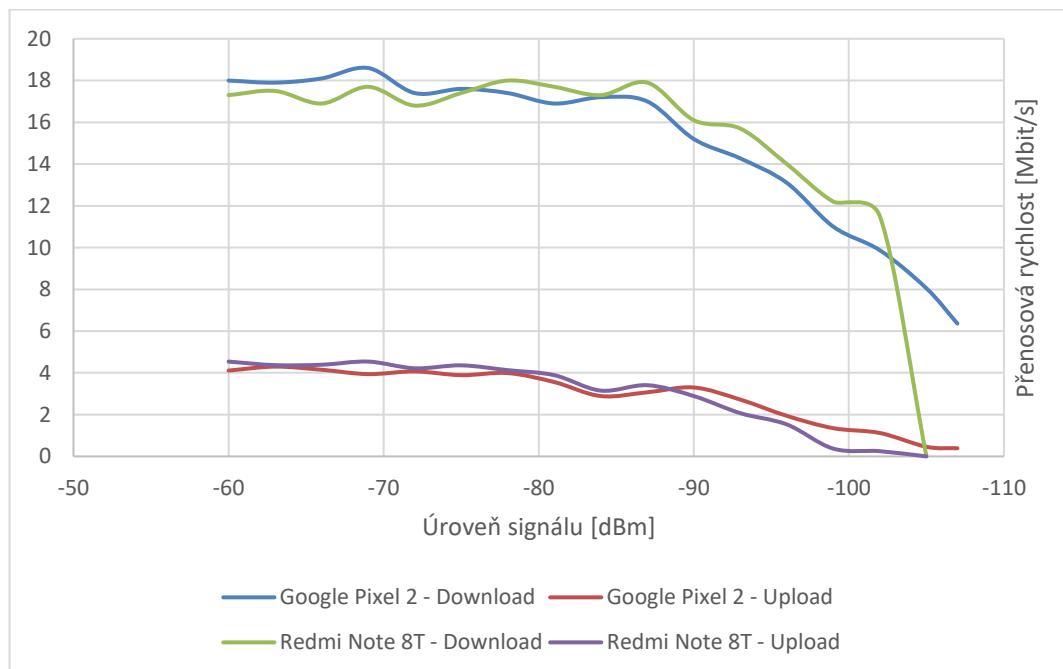
Druhý graf zobrazuje časové odezvy obou měřených mobilních zařízení, ty však nevykazují větších rozdílů. Přesto lze vidět, že v případě mobilního zařízení Redmi Note 8T dochází k rapidnímu zvýšení zhruba o 6 dBm dříve, než je tomu u druhého telefonu a následnému výpadku spojení.



Obrázek 1.30: Graf časové odezvy technologie GSM

### 7.1.2 UMTS

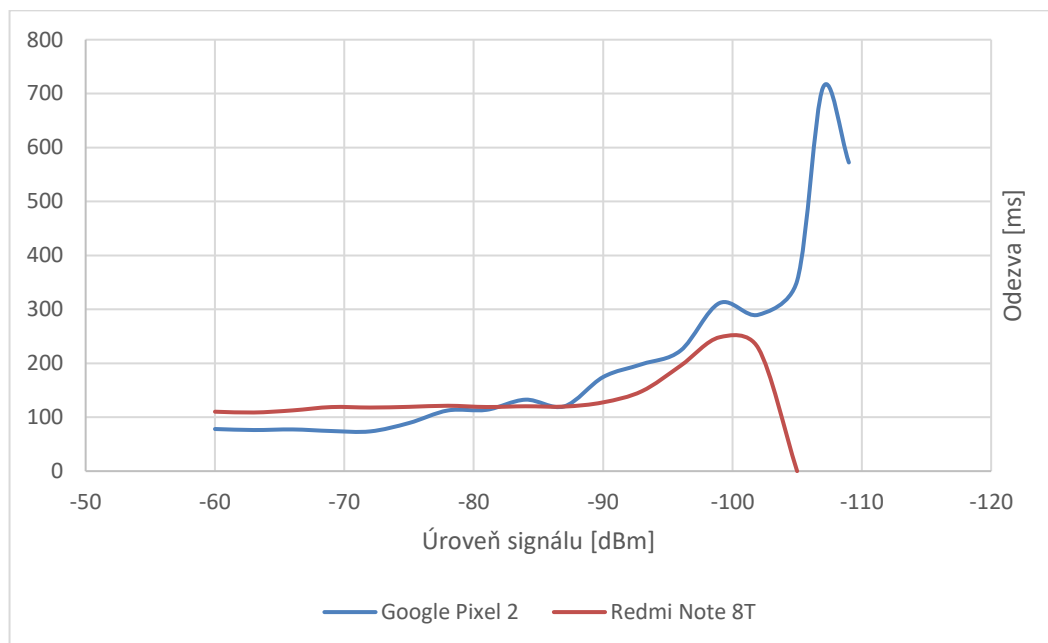
Následující graf zobrazuje rozdíl mezi přenosovými rychlostmi testovaných mobilních zařízení. V případě technologie UMTS dosahují oba telefony velmi podobných přenosových rychlostí, znovu lze však pozorovat, že u telefon Redmi Note 8T dochází ke ztrátě spojení mnohem dříve než je tomu u druhého testovaného zařízení.



Obrázek 1.31: Graf naměřených přenosových rychlostí technologie UMTS



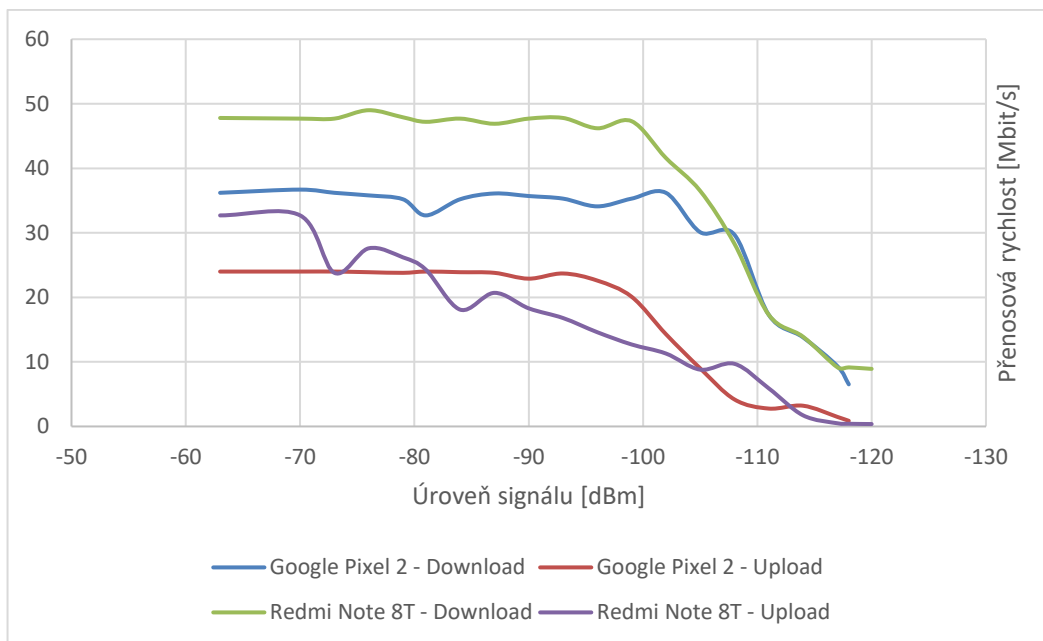
V případě odezvy je rozdíl viditelnější, kdy sice v případě telefonu Google Pixel 2 dochází k rapidnímu navýšení již při -87 dBm, avšak naproti tomu bylo možné navázat spojení i při nižších hodnotách signálu. Celkově jde vidět, že výrobci kladli větší důraz na technologie GSM a LTE, protože u technologie UMTS došlo k rozpadu spojení při stejných hodnotách signálu jako u GSM, přestože by technologie UMTS měl fungovat i při nižších hodnotách signálu.



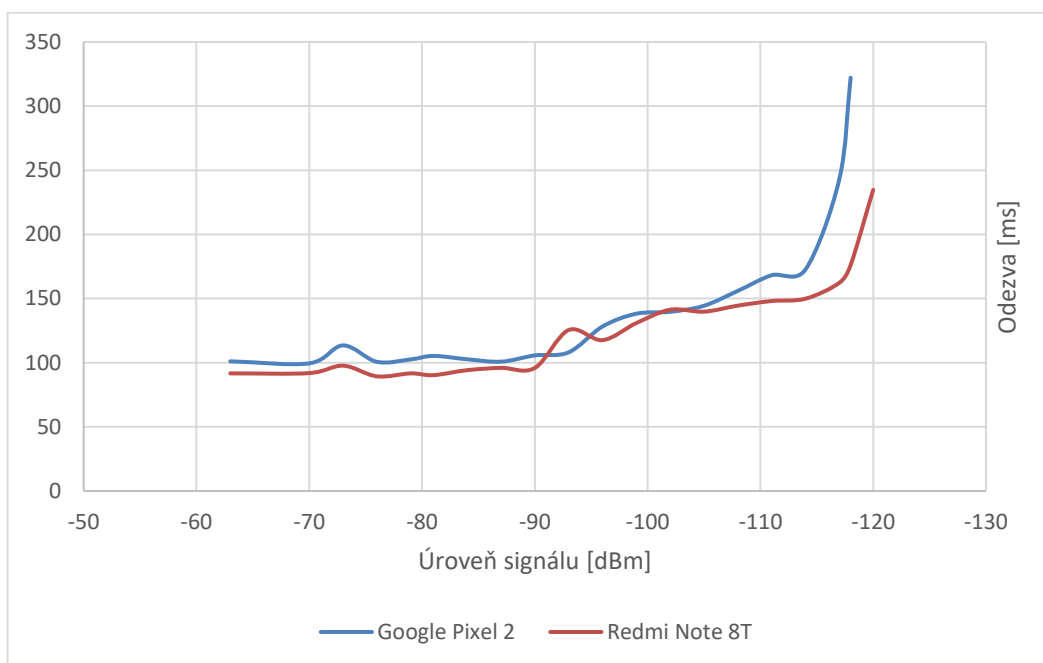
Obrázek 1.32: Graf časové odezvy technologie UMTS

### 7.1.3 LTE

V případě technologie LTE dopadl v testování o něco lépe mobilní telefon Xiaomi Redmi Note 8T, kdy na následujících grafech lze pozorovat, že tento telefon dosahoval větších přenosových rychlostí než Google Pixel 2. To je však z největší pravděpodobnosti způsobeno lepší hardwarovou výbavou a Google Pixel 2 není schopen větších přenosových rychlostí, které technologie LTE nabízí. Redmi Note 8T dokázal navázat spojení ještě při -120 dBm, kdy u druhého testovaného telefonu již nebylo možné navázat spojení se serverem. Znatelnější rozdíl lze pozorovat u časové odezvy, kterou má právě Google Pixel zhruba 10 milisekund větší a s menší úrovní přijímaného signálu rapidně roste a rozdíl se zvětšuje.



Obrázek 1.33: Graf naměřených přenosových rychlostí technologie LTE



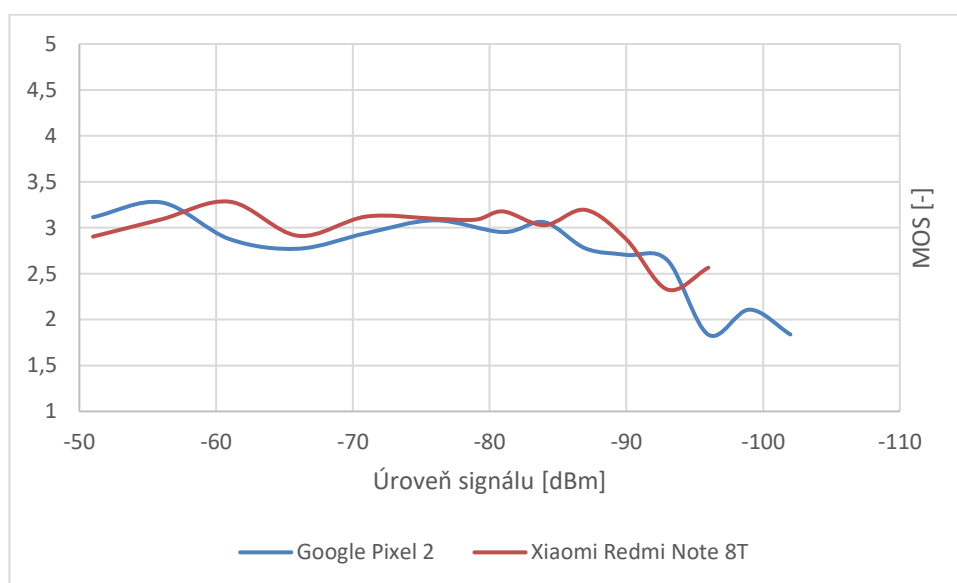
Obrázek 1.34: Graf časové odezvy technologie LTE

## 7.2 Testování hlasových hovorů

V této části budou porovnány naměřené hodnoty MOS jednotlivých zařízení pro technologie GSM, UMTS a LTE.

### 7.2.1 GSM

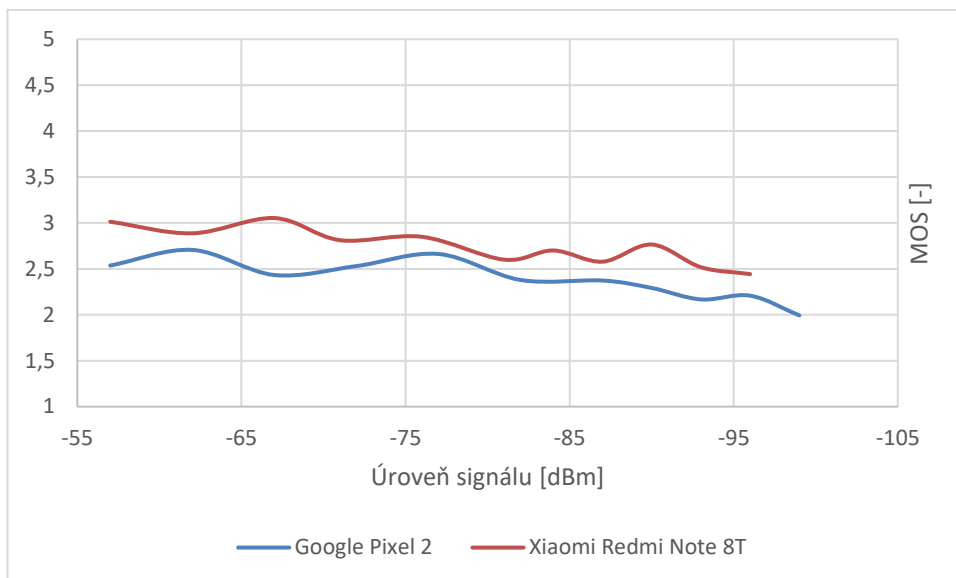
V případě kvality hlasových hovorů u technologie GSM dopadlo lépe mobilní zařízení Xiaomi Redmi Note 8T, které dosahuje větších hodnot MOS. Zároveň si však lze všimnout, že u tohoto zařízení dochází k dřívějšímu poklesu (již při úrovni signálu menší než -87 dBm) než je tomu u zařízení Google Pixel 2 (u tohoto zařízení dochází k výraznému poklesu až při úrovni menší než -93 dBm). Jelikož bylo nutné do bezodrazového boxu přivést kabel pro připojení audio výstupu testovaného zařízení, tak při nižších úrovních dochází k přepojení na jinou rádiovou buňku (k tomu u měření datových přenosů nedocházelo). K přepojení došlo dříve u zařízení Redmi Note 8T, tedy lze předpokládat, že toto zařízení je citlivější na menší úrovně signálu.



Obrázek 1.35: Naměřené hodnoty MOS u technologie GSM

### 7.2.2 UMTS

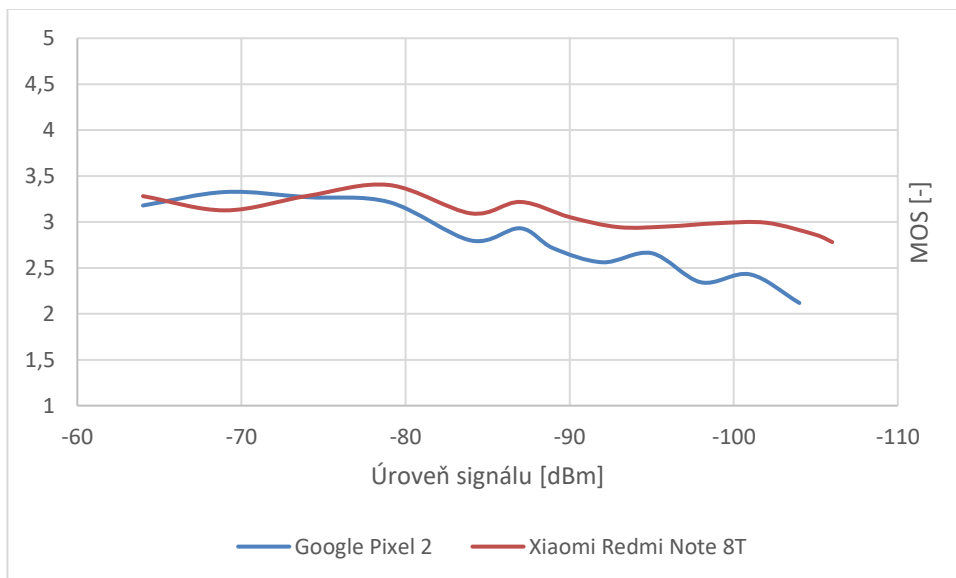
V případě technologie UMTS jsou výsledky velmi obdobné jako u technologie GSM a zařízení Xiaomi Redmi Note 8T dosahuje lepších hodnot MOS než Google Pixel 2. Celkově však jsou hodnoty MOS menší než u technologie GSM, což potvrzuje teoretické předpoklady, kdy technologie UMTS slouží především pro datové přenosy. V případě této technologie došlo k přepojení ještě dříve, než tomu bylo u GSM. To může být způsobeno buď velmi blízkou základnovou stanicí s touto technologií, nebo mají mobilní zařízení lepší citlivost na UMTS signály. Hodnoty MOS klesají v podstatě stejně strmě u obou zařízení.



Obrázek 1.36: Naměřené hodnoty MOS u technologie UMTS

### 7.2.3 LTE

Stejně jako u předchozích technologií i u LTE dosahuje lepších výsledků zařízení Xiaomi Redmi Note 8T. Dokonce lze pozorovat, že hodnoty MOS v případě tohoto zařízení skoro neklesají, respektive klesají velmi pozvolna. V případě zařízení Google Pixel 2 hodnoty MOS viditelně klesají s klesající úrovní signálu. V případě technologie LTE došlo k přepojení při úrovni signálu -106 dBm u zařízení Redmi Note 8T a při -104 dBm u zařízení Pixel 2.



Obrázek 1.37: Naměřené hodnoty MOS u technologie LTE

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout metodiku posuzování kvality příjmu GSM, UMTS a LTE signálu u mobilních telefonů a následné otestování vlivu na hlasové hovory a datové přenosy. V teoretické části diplomové práce se zabývám problematikou příjmu rádiového signálu a vlastnostmi dostupné základnové stanice v laboratoři EB209 na Fakultě elektrotechniky a informatiky.

Hlavním přínosem mé diplomové práce je pak navrhnutá metodika testování mobilních telefonů, kdy proces návrhu je popsán v 6. kapitole. Nejprve bylo potřeba navrhnout, jakým způsobem bude testování prováděno, respektive jaké nástroje k němu využít. V případě testování datových přenosů jsem zvolil nástroj iPerf3, který slouží pro testování přenosových rychlostí IP sítí pomocí protokolu TCP. Abych tento nástroj využil, byl potřeba linuxový server, který byl vytvořen na virtuálním stroji ve školní síti a který byl zároveň dostupný v případě protokolu TCP i mimo ní. Tomuto serveru byla přidělena veřejná IP adresa 158.196.109.146. Pro testování hlasových hovorů jsem využil softwarové pobočkové ústředny Asterisk, nainstalované na mikropočítači Raspberry Pi 3 model B. Tato ústředna může sloužit jako IVR systém, tedy systém, který přehraje do příchozího hovoru audio soubor. Asterisk ovšem slouží pro VoIP aplikace, proto jsem využil USB modem a společně s modulem Chan-Dongle jsem vytvořil gateway pro rádiové technologie GSM, UMTS a LTE.

Následně jsem navrhnul měřicí pracoviště, které se skládá z bezdrazového boxu s propojovací jednotkou pro připojení výstupu z dostupné základnové stanice a dvou útlumových článků. Tento box slouží pro odstínění nežádoucích vlivů a jiných provozovaných technologií v okolí laboratoře EB209. Propojovací jednotka pak slouží k přivedení rádiového signálu přímo ze základnové stanice bez použití externích antén. K tomu bylo zapotřebí útlumového článku, který přidává konstantní útlum 30 dB a slouží ke snížení vysílacího výkonu základnové stanice tak, aby nedošlo k poškození testovaného mobilního zařízení. Druhý útlumový článek je nastavitelný a slouží tedy k postupnému snižování přijímané úrovně signálu, tak aby bylo možné otestovat jaký vliv má úroveň signálu na provozované telekomunikační služby.

V průběhu měření pak připojuji jednotlivé technologie do propojovací jednotky a pomocí nastavení v mobilním zařízení definuji preferovaný typ používané technologie (pouze 2G, 3G nebo 4G). Výsledky měření datových přenosů jsou již směrodatné, jelikož měřím kvalitativní parametry, jako jsou download, upload nebo časová odezva. To v případě hlasových hovorů je nemožné a proto každý hovor nahrávám pomocí softwaru Audacity a připojením audio výstupu telefonu do počítače. Na nahraných hovorech následně provádím PESQ analýzu dle doporučení ITU-T P.862 a každému hovoru je pak vypočtena hodnota MOS pro určení jeho kvality. Před touto analýzou jsem však nahrávky upravil, což obsahovalo synchronizaci nahrávek s referenčním audio souborem a ekvalizaci všech stop na stejnou úroveň hlasitosti.

Výsledky měření datových přenosů ukazují, že testovaný telefon Google Pixel 2 je méně citlivý na zhoršení kvality rádiového signálu než druhé testované zařízení Xiaomi Redmi Note 8T. Tak lze pozorovat, že výrobci obou telefonů kladli větší důraz na technologie GSM a LTE,

kdy u technologie UMTS dochází k rozpadu spojení zhruba při stejné úrovni signálu jako je tomu u GSM. A to i přesto, že UMTS by dle teoretických poznatků mělo fungovat i při nižších úrovních, důvodem však může být i nastavení jednotlivých technologií telekomunikačním operátorem T-Mobile. V druhé části praktické části jsem otestoval hlasové hovory obou mobilních zařízení. Z výsledků je patrné, že kvalita signálu má menší vliv na kvalitu hovorů u telefonu Xiaomi Redmi Note 8T. Obzvláště u technologie LTE lze pozorovat, že hodnota MOS s klesajícím signálem klesají velmi pozvolna. Naměřené hodnoty MOS nedosahují vyšší hodnoty než cca 3,4. To je způsobené použitým kodekem na straně SW PBX Asterisk, ten bohužel jiný kodek nepodporuje. Hlavním smyslem metodiky je však posoudit vliv kvality signálu na kvalitu služeb - tedy určit trend jakým se kvalita zhoršuje. Dále je nutno zmínit, že cílem práce bylo navrhnout metodiku a ne otestovat co nejvíce zařízení. Proto v rámci práce testuji pouze dva mobilní telefony.

Závěrem bych chtěl uvést, že hlavním přínosem navržené metodiky je možnost objektivně posoudit vliv kvality signálu na kvalitu služeb. Metodiku mohou například využít redaktoři webových portálů, zabývajících se recenzemi mobilních zařízení. Popřípadě ji lze využít pro testování telefonů v rámci naší univerzity. Mým záměrem bylo navrhnout tuto metodiku za pomoci volně dostupných nástrojů, lze ji však obohatit například využitím placené aplikace Tems Pocket. Ta umožňuje funkci Cell Lock, tedy uzamčení mobilního telefonu na danou rádiovou buňku (pomocí identifikačního čísla buňky). Zároveň tato aplikace umožňuje měřit úroveň signálu, takže by úplně nahradila bezplatnou aplikaci Cell Monitor.

## Použitá literatura

- [1] DVORSKÝ, Marek. Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3557-0.
- [2] HANUS, Stanislav. BEZDRÁTOVÉ A MOBILNÍ KOMUNIKACE. Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-1833-8.
- [3] ROHDE, Ulrich, WHITAKER, Jerry. Communications Receivers: DSP, Software Radios, and Design. McGraw-Hill Professional. 3. Edition, 2003.
- [4] PANDEY, Anil. Practical microstrip and printed antenna design. Norwood, MA: Artech House, 2019. ISBN 978-1-63081-668-1.
- [5] HOY, Joseph. Forensic Radio Survey Techniques for Cell Site Analysis. John Wiley, 2015. ISBN 9781118925737.
- [6] FUJIMOTO, Kyohei a ITO, Koichi. Antennas for Small Mobile Terminals. Norwood, MA: Artech House, 2018. ISBN 978-1-63081-095-5.
- [7] APPENDIX F: DUT ANTENNA DIAGRAM & SAR TEST SETUP PHOTOGRAPHS [online]. 2018 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://fccid.io/A3LSMG9650/Test-Setup-Photos/SAR-Test-Setup-Photos-3724011.pdf>. SAR Evaluation Report. Federal Communications Commission.
- [8] MICHÁLEK, Libor a ŠEBESTA, Roman. Rádiové sítě II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO [online]. 2016. Skripta. VŠB-TU Ostrava.
- [9] 3900 Series Multi-Mode Base Station. Technická dokumentace. HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.
- [10] Indoor Multi-Band Directional Antenna. VVPol Indoor 790–960/1710–2700 C 90° 7dBi. Technická dokumentace. Kathrein.
- [11] P.862 : Revised Annex A - Reference implementations and conformance testing for ITU-T Recs P.862, P.862.1 and P.862.2. ITU-T. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/5374>
- [12] 3GPP TS 38.101-1. NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone. Release 17. 2021. Dostupné z: [Specification # 38.101-1 \(3gpp.org\)](#)
- [13] KARAPANTAZIS, Stylianos a PAVLIDOU, Fotini-Niovi. VoIP: A comprehensive survey on a promising technology [online]. Aristotle University of Thessaloniki: Department of Electrical and Computer Engineering. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.643.2285&rep=rep1&type=pdf>

- [14] P.862.3 : Application guide for objective quality measurement based on Recommendations P.862, P.862.1 and P.862.2 [online]. ITU-T. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862.3-200711-I/en>
- [15] P.56 : Objective measurement of active speech level [online]. ITU-T. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.56-201112-I/en>



## Seznam příloh

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Příloha A: | Naměřené hodnoty datových přenosů ..... | I   |
| Příloha B: | Naměřené hodnoty hlasových hovorů ..... | vii |

Součástí DP je příloha v IS EDISON.

Tabulka A.1: *Naměřené hodnoty datových přenosů technologie GSM u telefonu Google Pixel 2*

| Úroveň signálu [dBm] | Download [kbit/s] | Upload [kbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -51                  | 207               | 60              | 217,9       |
| -54                  | 193               | 59,2            | 217,8       |
| -57                  | 208               | 60,4            | 235         |
| -61                  | 209               | 59,2            | 234,5       |
| -64                  | 207               | 59,3            | 239,2       |
| -67                  | 207               | 59,2            | 236,1       |
| -70                  | 192               | 60,5            | 236,8       |
| -73                  | 198               | 59,9            | 234,9       |
| -76                  | 168               | 55,6            | 242,5       |
| -79                  | 208               | 59,2            | 238,9       |
| -82                  | 208               | 60,5            | 239,2       |
| -85                  | 208               | 59              | 238,9       |
| -88                  | 207               | 55              | 239,6       |
| -91                  | 198               | 60,5            | 242,9       |
| -94                  | 184               | 58,7            | 243,1       |
| -97                  | 175               | 45,1            | 246,9       |
| -100                 | 153               | 40,2            | 249,6       |
| -103                 | 143,2             | 38,7            | 332,7       |
| -106                 | 117,1             | -               | 395,3       |
| -107                 | 46,7              | -               | 534,2       |

Tabulka A.2: *Naměřené hodnoty datových přenosů technologie GSM u telefonu Xiaomi Redmi Note 8T*

| Úroveň signálu [dBm] | Download [kbit/s] | Upload [kbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -51                  | 164               | 70,8            | 238,2       |
| -54                  | 169               | 83,4            | 239         |
| -57                  | 163               | 70,8            | 234,9       |
| -61                  | 156               | 72,6            | 262         |
| -64                  | 157               | 70,8            | 240,1       |
| -67                  | 163               | 53,6            | 238,9       |
| -70                  | 164               | 71              | 237,7       |
| -73                  | 164               | 53,4            | 245,7       |
| -76                  | 157               | 59,3            | 234,8       |
| -79                  | 156               | 60,1            | 286,2       |
| -82                  | 157               | 62,1            | 243,9       |
| -85                  | 154,6             | 49,6            | 240,2       |
| -88                  | 153,7             | 52,1            | 243,1       |
| -91                  | 151               | 47,2            | 246,3       |
| -94                  | 149,1             | 33,7            | 259,7       |
| -97                  | 135               | 36,3            | 322,9       |
| -100                 | 115               | 34,5            | 361,7       |
| -103                 | 111               | 24,7            | 387,1       |
| -106                 | -                 | -               | -           |
| -107                 | -                 | -               | -           |

Tabulka A.3: *Naměřené hodnoty datových přenosů technologie UMTS u telefonu Google Pixel 2*

| Úroveň signálu [dBm] | Download [Mbit/s] | Upload [Mbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -60                  | 18                | 4,11            | 78,1        |
| -63                  | 17,9              | 4,3             | 76,2        |
| -66                  | 18,1              | 4,15            | 77,3        |
| -69                  | 18,6              | 3,94            | 74,4        |
| -72                  | 17,4              | 4,07            | 73,7        |
| -75                  | 17,6              | 3,89            | 89,2        |
| -78                  | 17,4              | 3,99            | 112,5       |
| -81                  | 16,9              | 3,56            | 113,7       |
| -84                  | 17,2              | 2,89            | 132,5       |
| -87                  | 17                | 3,07            | 120,1       |
| -90                  | 15,2              | 3,3             | 174,4       |
| -93                  | 14,27             | 2,72            | 198,3       |
| -96                  | 13,1              | 1,94            | 223,7       |
| -99                  | 11                | 1,35            | 311,6       |
| -102                 | 9,87              | 1,12            | 289,9       |
| -105                 | 8,05              | 0,46            | 352,8       |
| -107                 | 6,36              | 0,39            | 711,2       |
| -109                 | 4,37              | 0,31            | 572,3       |

---

Tabulka A.4: *Naměřené hodnoty datových přenosů technologie UMTS u telefonu Xiaomi Redmi Note 8T*

| Úroveň signálu [dBm] | Download [Mbit/s] | Upload [Mbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -60                  | 17,3              | 4,54            | 110,2       |
| -63                  | 17,5              | 4,37            | 108,7       |
| -66                  | 16,9              | 4,39            | 112,6       |
| -69                  | 17,7              | 4,54            | 118,8       |
| -72                  | 16,8              | 4,22            | 117,9       |
| -75                  | 17,4              | 4,36            | 119,2       |
| -78                  | 18                | 4,13            | 121,2       |
| -81                  | 17,7              | 3,89            | 118,9       |
| -84                  | 17,3              | 3,15            | 120,3       |
| -87                  | 17,9              | 3,41            | 119,7       |
| -90                  | 16,1              | 2,89            | 127,5       |
| -93                  | 15,7              | 2,07            | 148,2       |
| -96                  | 14                | 1,53            | 195,6       |
| -99                  | 12,2              | 0,37            | 248,2       |
| -102                 | 11,5              | 0,25            | 227,9       |
| -105                 | -                 | -               | -           |
| -107                 | -                 | -               | -           |
| -109                 | -                 | -               | -           |

Tabulka A.5: Naměřené hodnoty datových přenosů technologie LTE u telefonu Google Pixel 2

| Úroveň signálu [dBm] | Download [Mbit/s] | Upload [Mbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -63                  | 36,2              | 24              | 101,1       |
| -70                  | 36,7              | 24              | 99,5        |
| -73                  | 36,2              | 24              | 113,5       |
| -76                  | 35,8              | 23,9            | 100,7       |
| -79                  | 35,2              | 23,8            | 102,6       |
| -81                  | 32,7              | 24              | 105,3       |
| -84                  | 35,2              | 23,9            | 102,7       |
| -87                  | 36,1              | 23,8            | 100,8       |
| -90                  | 35,7              | 22,9            | 105,7       |
| -93                  | 35,3              | 23,7            | 108,1       |
| -96                  | 34,1              | 22,6            | 128,2       |
| -99                  | 35,3              | 20,1            | 138,2       |
| -102                 | 36,2              | 14,3            | 139,7       |
| -105                 | 30,1              | 9               | 144,4       |
| -108                 | 29,7              | 4,18            | 156         |
| -111                 | 17,3              | 2,77            | 168,2       |
| -114                 | 13,8              | 3,21            | 172,7       |
| -117                 | 9,35              | 1,48            | 243,1       |
| -118                 | 6,52              | 0,87            | 322,1       |
| -120                 | -                 | -               | -           |

---

Tabulka A.6: *Naměřené hodnoty datových přenosů technologie UMTS u telefonu Xiaomi Redmi Note 8T*

| Úroveň signálu [dBm] | Download [Mbit/s] | Upload [Mbit/s] | Odezva [ms] |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| -63                  | 47,8              | 32,7            | 91,7        |
| -70                  | 47,7              | 32,7            | 91,9        |
| -73                  | 47,7              | 23,8            | 97,7        |
| -76                  | 49                | 27,6            | 89,4        |
| -79                  | 47,9              | 26,2            | 91,7        |
| -81                  | 47,2              | 24,3            | 90,3        |
| -84                  | 47,7              | 18,1            | 94,2        |
| -87                  | 46,9              | 20,7            | 96          |
| -90                  | 47,7              | 18,3            | 95,9        |
| -93                  | 47,8              | 16,8            | 125,5       |
| -96                  | 46,2              | 14,6            | 117,6       |
| -99                  | 47,3              | 12,7            | 130,9       |
| -102                 | 41,6              | 11,3            | 141,3       |
| -105                 | 36,5              | 8,8             | 139,8       |
| -108                 | 28,3              | 9,7             | 144,5       |
| -111                 | 17,3              | 5,9             | 148,1       |
| -114                 | 13,9              | 1,72            | 149,9       |
| -117                 | 9,17              | 0,49            | 162,3       |
| -118                 | 9,15              | 0,41            | 176,1       |
| -120                 | 8,92              | 0,37            | 234,7       |

---

Příloha B:      *Naměřené hodnoty MOS pro hlasové hovory*

*Tabulka B.1: Naměřené hodnoty MOS u technologie GSM*

| Google Pixel 2 |         | Xiaomi Redmi 8T |         |
|----------------|---------|-----------------|---------|
| Úroveň [dBm]   | MOS [-] | Úroveň [dBm]    | MOS [-] |
| -57            | 2,536   | -57             | 3,013   |
| -62            | 2,706   | -62             | 2,887   |
| -67            | 2,433   | -67             | 3,053   |
| -72            | 2,53    | -71             | 2,812   |
| -77            | 2,662   | -76             | 2,849   |
| -82            | 2,379   | -81             | 2,6     |
| -87            | 2,373   | -84             | 2,7     |
| -90            | 2,292   | -87             | 2,578   |
| -93            | 2,167   | -90             | 2,765   |
| -96            | 2,208   | -93             | 2,518   |
| -99            | 1,993   | -96             | 2,443   |



---

*Tabulka B.2: Naměřené hodnoty MOS u technologie UMTS*

| Google Pixel 2 |         | Xiaomi Redmi 8T |         |
|----------------|---------|-----------------|---------|
| Úroveň [dBm]   | MOS [-] | Úroveň [dBm]    | MOS [-] |
| -57            | 2,536   | -57             | 3,013   |
| -62            | 2,706   | -62             | 2,887   |
| -67            | 2,433   | -67             | 3,053   |
| -72            | 2,53    | -71             | 2,812   |
| -77            | 2,662   | -76             | 2,849   |
| -82            | 2,379   | -81             | 2,6     |
| -87            | 2,373   | -84             | 2,7     |
| -90            | 2,292   | -87             | 2,578   |
| -93            | 2,167   | -90             | 2,765   |
| -96            | 2,208   | -93             | 2,518   |
| -99            | 1,993   | -96             | 2,443   |

---

*Tabulka B.3: Naměřené hodnoty MOS u technologie LTE*

| Google Pixel 2 |         | Xiaomi Redmi 8T |         |
|----------------|---------|-----------------|---------|
| Úroveň [dBm]   | MOS [-] | Úroveň [dBm]    | MOS [-] |
| -64            | 3,179   | -64             | 3,281   |
| -69            | 3,326   | -69             | 3,126   |
| -74            | 3,27    | -74             | 3,283   |
| -79            | 3,216   | -79             | 3,402   |
| -84            | 2,798   | -84             | 3,093   |
| -87            | 2,931   | -87             | 3,218   |
| -89            | 2,714   | -90             | 3,053   |
| -92            | 2,561   | -93             | 2,943   |
| -95            | 2,66    | -96             | 2,951   |
| -98            | 2,343   | -99             | 2,986   |
| -101           | 2,429   | -102            | 2,991   |
| -104           | 2,118   | -105            | 2,86    |
|                |         | -106            | 2,781   |